



Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM

# **BIOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS: ENVELHECIMENTO AMBIENTAL, INTEGRIDADE ESTRUTURAL E PROCESSO DE RECICLAGEM.**

**KILDER CÉSAR DE ARAÚJO RIBEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do grau de DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dra. Eve Maria Freire de Aquino

Natal  
Dezembro/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM

**Kilder César de Araújo Ribeiro**

**BIOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS:  
ENVELHECIMENTO AMBIENTAL, INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
E PROCESSO DE RECICLAGEM.**

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup>. Dra. Eve Maria Freire de Aquino

PPGEM N°. 22

NATAL  
2012

## DEDICATÓRIA

---

Esta tese de doutorado é dedicada a minha mãe Edna de Araújo Ribeiro, por todo seu esforço na compreensão do meu desafio, pelo apoio, suporte e perseverante estímulo dado para a concretização deste projeto.

## AGRADECIMENTOS

---

Aos meus irmãos: Flaubert de Araújo Ribeiro, pelos importantes conselhos para o aprimoramento do meu caráter e melhor aproveitamento de meus potenciais; Demétrius Magnus de Araújo Ribeiro, pela torcida, apoio nos momentos difíceis e carinho sincero e Ricardo Lúcio de Araújo Ribeiro, pela indicação do caminho para o início deste desafio.

Ao amigo e irmão de coração, Humberto de Araújo Ribeiro, por ter usado as palavras certas para despertar as forças latentes e necessárias para reencontrar meu equilíbrio e caminho espiritual.

A professora e orientadora, Eve Maria Freire de Aquino, por ter me ensinado o real caminho da pesquisa científica e da perseverança pelo aperfeiçoamento continuado do trabalho.

Aos professores da UFRN, Aldomar Pedrini e George Santos Marinho, pela atenção dedicada no início do projeto.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Engenharia e Ciências de Materiais, Engenharia Têxtil e demais programas da UFRN, pelos valiosos conhecimentos prestados dentro e fora de sala de aula.

Aos professores da UFRN, Hector Luís Lopes Salinas (In memoriam) e Viviane Fonseca Muniz, pela amizade e companheirismo na atuação junto ao Programa de Assistência a Docência do REUNI.

Aos colegas de pós-graduação pela cooperação durante os experimentos, aos doutorandos professores do IFBA pela amizade e incentivo ao longo do trabalho e em especial a Evans Paiva da Costa Ferreira, pela decisiva colaboração na fabricação dos materiais.



## SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>Introdução e Justificativa</b>	<b>1</b>
1.1.	Contribuição Científica	3
1.2.	Objetivo Geral	3
1.3.	Objetivos Específicos	3
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1.	Materiais Compósitos e os Biocompósitos	5
2.2.	Compósitos Laminados	9
2.3.	Compósitos com Estrutura Sanduiche	11
2.4.	Resina Poliéster Náutica	13
2.5.	Fibras Vegetais	16
2.5.1.	Fibras Provenientes de Sementes	17
2.5.2	Fibras de Frutas	17
2.5.3	Fibras de Folhas	18
2.5.4.	Fibras de Grãos/Palha	19
2.5.5.	Outras Fibras	19
2.5.6.	Fibras Duras ou Provenientes do Caule	20
2.5.6.1.	Fibras de Juta	21
2.5.6.2.	Propriedades Mecânicas das Fibras de Juta	23
2.5.7.	Fibras Lenhosas	25
2.5.7.1.	Fibras de Madeiras	26
2.5.7.2.	Núcleo com Fibras de Madeiras	28
2.6.	Envelhecimento Ambiental Acelerado	29
2.6.1.	Envelhecimento por Imersão	33
2.6.2.	Envelhecimento Ambiental Acelerado de Biocompósitos	34
2.7.	Características da Fratura Mecânica	37
2.7.1.	Microfissuração na Matriz	38
2.7.2.	Delaminação	40
2.7.3.	Ruptura de Fibras	40
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos Experimentais</b>	<b>42</b>
3.1.	Materiais	42
3.1.1.	Resina Náutica	42
3.1.2.	Resíduos de Madeira	43
3.1.3.	Tecido Bidirecional de fibras de Juta	45
3.2.	Fabricação e Configuração dos Biocompósitos	45
3.2.1.	Painel Sanduiche Biocomposito Madeira/Juta – Painel BMJ	46
3.2.2.	Laminado Biocomposito de Fibras de Juta – Laminado BJ	48

3.2.3.	Reciclagem do Painei BMJ – Painei BMJ-R	50
3.2.4.	A Moldagem da Placa de Resina Náutica (RN + NPG)	53
3.2.5.	A Preparação dos Corpos de Prova dos Biocompósitos	56
3.2.6.	A Preparação dos Corpos de Prova do RN+NPG	57
3.3.	Análise da Fratura Mecânica	58
3.4.	Ensaio Realizados	58
3.4.1.	Ensaio de Tração Uniaxial	58
3.4.2.	Ensaio de Flexão em Três Pontos	59
3.4.3.	Ensaio de Compressão Uniaxial	60
3.4.4.	Ensaio de Absorção de Umidade	62
3.4.5.	Ensaio de Densidade Volumétrica	64
3.5.	Teste de Envelhecimento Ambiental Acelerado	64
3.5.1.	Câmara de Envelhecimento Acelerado	64
3.5.2.	Procedimento e Controle Contínuo do Envelhecimento Acelerado	66
3.5.3.	Medição da Variação de Massa Durante o Ensaio de Envelhecimento	68
<b>4</b>	<b>RN + NPG - Resultados e Discussão</b>	69
4.1.	Propriedades Mecânicas	69
4.1.1.	Desempenho Mecânico da RN+NPG na Tração Uniaxial	69
4.1.2.	Desempenho Mecânico da RN+NPG na Flexão em Três Pontos	70
4.1.3.	Comparativo: Desempenho Mecânico x Dados do Fabricante	71
4.2.	Característica da Fratura	71
4.3.	Deterioração e Perda de Massa no Envelhecimento Ambiental	72
4.3.1.	Deterioração e Perda de Massa da RN+NPG	72
<b>5</b>	<b>Laminado BJ - Resultados e Discussão</b>	75
5.1.	Laminado BJ	75
5.1.1.	Característica Microestrutural do Laminado BJ	76
5.1.2.	Ensaio de Densidade Volumétrica	77
5.1.3.	Laminado BJ – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial	78
5.1.4.	Análise da Fratura do Laminado BJ na Tração Uniaxial	79
5.1.5.	Laminado BJ – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos	81
5.1.6.	Análise da Fratura do Laminado BJ na Flexão em Três Pontos	82
5.1.7.	Laminado BJ – Desempenho Mecânico na Compressão Uniaxial	84
5.1.8.	Análise da Fratura do Laminado BJ na Compressão Uniaxial	85
5.2.	<b>Laminado BJ-E</b>	88
5.2.1.	Característica Macroestrutural do Laminado BJ-E - Fotoxidação	88
5.2.2.	Deterioração por Perda de Massa do Laminado BJ-E	91
5.2.3.	Laminado BJ-E – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial	92
5.2.4.	Análise da Fratura do Laminado BJ-E na Tração Uniaxial	93
5.2.5.	Laminado BJ-E – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos	95
5.2.6.	Análise da Fratura do Laminado BJ-E na Flexão em Três Pontos	96

5.3.	Influência do Envelhecimento Acelerado nas Propriedades Mecânicas do Laminado BJ-E	98
5.3.1.	Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Laminado BJ	98
5.3.2.	Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Laminado BJ-E	101
<b>6</b>	<b>Painel BMJ - Resultados e Discussão</b>	104
6.1.	Painel BMJ	104
6.1.1.	Característica Microestrutural do Painel BMJ	105
6.1.2.	Ensaio de Densidade Volumétrica do Painel BMJ	106
6.1.3.	Painel BMJ – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial	107
6.1.4.	Análise da Fratura do Painel BMJ na Tração Uniaxial	108
6.1.5.	Painel BMJ – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos	111
6.1.6.	Análise da Fratura do Painel BMJ na Flexão em Três Pontos	113
6.1.7.	Painel BMJ – Desempenho Mecânico na Compressão Uniaxial	115
6.1.8.	Análise da Fratura do Painel BMJ na Compressão Uniaxial	116
6.2.	<b>Painel BMJ-E</b>	119
6.2.1.	Característica Macroestrutural do Painel BMJ - Fotoxidação	119
6.2.2.	Deterioração por Perda de Massa do Laminado BJ-E	122
6.2.3.	Painel BMJ-E – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial	123
6.2.4.	Análise da Fratura do Painel BMJ-E na Tração Uniaxial	124
6.2.5.	Painel BMJ-E – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos	127
6.2.6.	Análise da Fratura do Painel BMJ-E na Flexão em Três Pontos	128
6.3.	Influência do Envelhecimento nas Propriedades do Painel BMJ-E	130
6.3.1.	Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Painel BMJ-E	131
6.3.2.	Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Painel BMJ-E	133
6.4.	<b>Painel BMJ-U</b>	135
6.4.1.	Absorção de Umidade do Painel BMJ-U	135
6.4.2.	Painel BMJ-U – Absorção de Umidade Utilizando Água Destilada	136
6.4.3.	Painel BMJ-U – Absorção de Umidade Utilizando Água do Mar	137
6.4.4.	Painel BMJ-U – Comparativo entre Absorção (Água Destilada x Água do Mar)	138
6.4.5.	Painel BMJ-U – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial - Água Destilada	139
6.4.6.	Análise da Fratura do Painel BMJ-U na Tração Uniaxial – Água Destilada	140
6.4.7.	Painel BMJ-U - Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos - Água Destilada	142
6.4.8.	Análise da Fratura do Painel BMJ-U na Flexão em Três Pontos - Água Destilada	143
6.5.	Influência da Absorção de Umidade nas Propriedades Mecânicas do Painel BMJ	146
6.5.1.	Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Painel BMJ-U	146
6.5.2.	Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Painel BMJ-U	149
<b>7</b>	<b>Painel BMJ-R (Reciclado) - Resultados e Discussão</b>	152
7.1.	Painel BMJ-R	153
7.1.1.	Características Microestruturais do Painel BMJ-R	153
7.1.2.	Ensaio de Densidade Volumétrica do Painel BMJ-R	154
7.1.3.	Painel BMJ-R – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial	155

7.1.4.	Análise da Fratura do Painei BMJ-R na Tração Uniaxial	156
7.1.5.	Painei BMJ-R – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos	157
7.1.6.	Análise da Fratura do Painei BMJ-R na Flexão em Três Pontos	158
7.1.7.	Painei BMJ-R – Desempenho Mecânico na Compressão Uniaxial	160
7.1.8.	Análise da Fratura do Painei BMJ-R na Compressão Uniaxial	161
7.2.	Influência do Processo de Reciclagem para o Painei BMJ-R	163
7.2.1.	Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Painei BMJ-E	164
7.2.2.	Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Painei BMJ-R	166
7.2.3.	Integridade Estrutural na Compressão Uniaxial do Painei BMJ-R	168
<b>8</b>	<b>Influência da Configuração no Desempenho Mecânico dos Biocompósitos</b>	172
8.1.	Comparativo de Fratura em Biocompósitos	172
8.1.1.	Fratura nos Biocompósitos no Estado Original	173
8.1.2.	Fratura nos Biocompósitos no Estado Envelhecido	175
8.2.	Comparativo de Desempenho Mecânico dos Biocompósitos	176
8.2.1.	Desempenho Mecânico dos Biocompósitos no Estado Original	176
8.2.2.	Integridade Estrutural dos Biocompósitos no Estado Envelhecido	178
8.3.	Comparativo de Deterioração por Perda de Massa	181
<b>9</b>	<b>Conclusões</b>	183
9.1	Análise da Fratura dos Materiais em Estado Original	183
9.2	Análise da Fratura dos Materiais Envelhecidos	183
9.3	Desempenho Físico e Mecânico dos Materiais em Estado Original	184
9.4	Integridade Estrutural dos Biocompósitos Envelhecidos	184
9.5	Deterioração por Perda de Massa	185
9.6	Processo de Reciclagem do Painei BMJ	186
9.7	Observações Finais	186
9.8	Recomendações para Futuros Trabalhos	187
<b>10</b>	<b>Referências</b>	188

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

3D – Tridimensional  
AHA – American National Standard Institute  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
BJ – Biocompósito Juta  
BJ-E – Biocompósito Juta Envelhecido  
BMJ – Biocompósito Madeira-Juta  
BMJ-E – Biocompósito Madeira-Juta Envelhecido  
BMJ-R – Biocompósito Madeira-Juta Reciclado  
BMJ-U – Biocompósito Madeira-Juta saturado na Água Destilada (umidade)  
BPMCC – Base de Pesquisa em Materiais Compósitos e Cerâmicos.  
CARE – Cooperative of American Relief Everywhere  
CEN – Comité Européen de Normalisation  
CTGÁS-ER – Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis  
EFB – Empty Fiber Branch  
EG – European Guideline  
HET – Ácido  
INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia  
ISO – International Standardization Society  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
NPG – Neopentil Glicol  
PALF – Pineapple Leaf Fiber  
PLLA – Poly (lactic) Acid  
PP – Polipropileno  
PVC – Cloreto de Polivinila  
RN+NPG – Resina Náutica com Neopentil Glicol  
TAPPI - Standard Test Method  
UNDP – United Nations Development Programme  
UNIDO – United Nations Industrial Development Organization  
UV – Ultravioleta

## LISTA DE EQUAÇÕES E UNIDADES

---

### EQUAÇÕES

Equação 3.1.	Cálculo do fator de flambagem do corpo de prova para o ensaio de compressão uniaxial.	62
Equação 3.2.	Cálculo do teor de absorção de umidade	63
Equação 3.3.	Cálculo da densidade volumétrica dos biocompósitos	64
Equação 3.4	Medição da Variação de Massa Durante o Ensaio de Envelhecimento (Adaptada)	68

### UNIDADES E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
g	Gramas
mg	Miligramas
mm	Milímetros
ml	Mililitro
rpm	Rotações por Minuto
µm	Micrômetro
min	Minutos
h	Horas
°C	Graus Celsius
W	Watts
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por Centímetro Cúbico
g/m <sup>2</sup>	Gramas por Metro Quadrado
km <sup>2</sup>	Quilômetros Quadrados

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Amostras de materiais utilizados na produção de biocompósitos (Jetson Green, 2012).	7
Figura 2.2.	Estrutura típica de um compósito laminado.	10
Figura 2.3.	Biocompósitos laminares biodegradáveis de resina vegetal e fibras de bananeira da Fibra Design Sustentável (Ullmann, 2012).	11
Figura 2.4.	Estrutura típica de um compósito sanduiche.	12
Figura 2.5.	Propagação da delaminação durante ensaio em amostras H200 – PVC Foam Core (Xiaoming Li e Weitsman, 2004).	13
Figura 2.6.	Cadeia Poliéster Isoftálica.	14
Figura 2.7.	Classificação das Fibras Naturais Vegetais (Adaptado de Mohanty et al., 2005).	16
Figura 2.8.	Folhas de fibra da banana (Artes de Minas apud Alibaba.com, 2012).	17
Figura 2.9.	a) Fibras de curauá. (Aquino et. al, 2008); b) Tecido de fibras de licuri. (Leão, 2008).	18
Figura 2.10.	(a) fibras de bambu (Bambrotex, 2012); (b) MEV de superfície transversal de espécie de bambu (Marinelli et al., 2008).	19
Figura 2.11.	Secção transversal da estrutura interna de uma fibra de caule (Adaptado de Raven et al., 2007).	20
Figura 2.12.	a) Secagem e b) fabricação industrial da fibra de juta (Pautas na Web, 2012).	22
Figura 2.13.	Produção de fibra de juta no Brasil (Ning, 2012).	23
Figura 2.14.	Farinha de pinho com granulometrias variadas (Pioneer Sawdust, 2012).	27
Figura 2.15.	Compósito híbrido desenvolvido por Silva et al. (2011).	29
Figura 2.16.	a) Arquivo envelhecido naturalmente; b) arquivo envelhecido aceleradamente fechado e c) arquivo envelhecido aceleradamente aberto (Batterhan e Rai, 2008).	31
Figura 2.17.	Equipamento de emissão de radiação UV adaptado no interior de uma estufa (La Counta et al., 2001).	35
Figura 2.18.	a) MEV do compósito não envelhecido; b) MEV do compósito após 8 semanas de exposição ao UV (Seldén et al. (2004).	36
Figura 2.19.	Microfissuração na matriz. (Tinô, 2010).	39
Figura 2.20.	Características da fratura em compósitos poliméricos. (Adaptado de Tinô, 2010).	39
Figura 2.21.	Delaminação entre as camadas de fibras em um compósito híbrido (Adaptado do Banco de dados da BPMCC – DEM/UFRN, 2008).	40
Figura 2.22.	a) Presença de rasgamento na fratura (Tinô, 2010); (b) Análise microscópica (MEV) de uma ruptura da fibra de Juta (Aquino, 2009).	41
Figura 3.1.	a) Estufa para o condicionamento dos resíduos de madeira; (b) Acondicionamento dos resíduos; (c) Fragmentação em moinho excêntrico (d) Peneiramento e classificação dos resíduos.	44
Figura 3.2.	Amostra do tecido bidirecional de fibras de juta com trama fechada.	45
Figura 3.3.	a) Face do painel BMJ; b) Seção longitudinal do painel BMJ.	46

Figura 3.4.	a) Mistura dos resíduos de madeira com a resina náutica; b) montagem do núcleo em molde aberto; c) transporte do núcleo impregnado sobre as camadas de tecido bidirecional de fibras de juta já laminadas e d) acabamento final do painel BMJ.	47
Figura 3.5.	Configuração simulada em 3D do painel BMJ.	48
Figura 3.6.	a) Face externa do laminado BJ e b) Seção longitudinal do laminado BJ.	49
Figura 3.7.	Configuração simulada em 3D do laminado BJ.	49
Figura 3.8.	Laminação manual do laminado BJ e seu acabamento final.	50
Figura 3.9.	a) Face externa do painel BMJ-R e b) Seção longitudinal do painel BMJ-R com detalhe do núcleo ampliado.	51
Figura 3.10.	Evolução do processamento do reforço do núcleo do painel BMJ-R: a) Corpos de prova envelhecidos partidos com martelo; b) Material fragmentado ainda com resina; c) Material processado ainda com partes do compósito; d) Material após processamento.	51
Figura 3.11.	Separação dos materiais do núcleo do painel BMJ-R: a) Resíduos de madeira; b) Fibras de juta trituradas.	52
Figura 3.12.	Preparação do painel BMJ-R: (a) Laminação das primeiras camadas de tecido de juta; b) montagem e uniformização do núcleo; (c) montagem do véu de poliéster como limitador do núcleo e (d) acabamento final.	53
Figura 3.13.	Partes e montagem do molde fechado para fabricação da placa RN+NPG.	54
Figura 3.14.	a) Fixação dos limitadores de espessura; b) Base do molde aberto; c) Pesagem da resina com o molde já fechado.	55
Figura 3.15.	Detalhes do preenchimento do molde para o RN+NPG.	55
Figura 3.16.	a) Mesa de corte a laser utilizada; b) Execução do corte dos corpos de prova RN+NPG.	57
Figura 3.17.	Formato e dimensões dos corpos de prova para tração uniaxial do RN+NPG.	57
Figura 3.18.	Ensaio de flexão em três pontos do da RN+NPG.	60
Figura 3.19.	Ensaio de flexão em três pontos do painel BMJ.	60
Figura 3.20.	Garras de compressão uniaxial (Adaptado de Freire Jr, 2001).	61
Figura 3.21.	Peças desenvolvidas para ajustes da garra de compressão uniaxial.	61
Figura 3.22.	Unidades da câmara de envelhecimento acelerado (Santos F, 2012).	66
Figura 3.23.	Vista interna da câmara de envelhecimento em funcionamento (Santos F, 2012).	66
Figura 3.24.	Pesagem dos corpos de prova durante envelhecimento acelerado.	67
Figura 4.1.	Diagrama de tensão versus deformação do RN+NPG na tração uniaxial.	69
Figura 4.2.	Diagrama de tensão versus deflexão do RN+NPG.	70
Figura 4.3.	RN+NPG - Corpo de prova ensaiado na tração uniaxial.	72
Figura 4.4.	RN+NPG - Corpos de prova ensaiados na flexão em três pontos.	72
Figura 4.5.	RN+NPG - Perda média de massa durante teste de envelhecimento acelerado.	73
Figura 4.6.	RN+NPG: a) Corpo de prova original; b) Corpo de prova envelhecido aceleradamente (efeito da fotodegradação).	74
Figura 5.1.	Laminado BJ – Macroestrutura dos corpos de prova de tração.	76
Figura 5.2.	Microestrutura do Laminado BJ - Seção longitudinal.	77



Figura 5.3.	Diagrama tensão versus deformação do Laminado BJ na tração uniaxial.	78
Figura 5.4.	Laminado BJ - Característica da fratura na tração uniaxial.	79
Figura 5.5.	Laminado BJ – Área de concentração de microfissuras no ensaio de tração uniaxial.	80
Figura 5.6.	Laminado BJ – Região da fratura final na tração uniaxial.	80
Figura 5.7.	Laminado BJ na tração uniaxial: a) Microfissura transversal; b) Fraturas adesivas em mechas do tecido de juta.	81
Figura 5.8.	Diagrama de tensão versus deflexão do Laminado BJ.	81
Figura 5.9.	Laminado BJ - Seção longitudinal com ampliação da fratura final na flexão em três pontos.	82
Figura 5.10.	Laminado BJ – Fenda em região rica em resina na flexão em três pontos.	83
Figura 5.11.	Laminado BJ – Característica da fratura final do na flexão em três pontos.	83
Figura 5.12.	Laminado BJ - MEV de Fratura ramificada na flexão em três pontos.	84
Figura 5.13.	Diagrama de tensão versus deformação do laminado BJ na compressão uniaxial.	84
Figura 5.14.	Laminado BJ – Seção longitudinal de corpos de prova fraturados na compressão uniaxial.	86
Figura 5.15.	Laminado BJ – Presença de furos na região fraturada na compressão.	86
Figura 5.16.	Laminado BJ – Presença de rasgo na região fraturada na compressão.	87
Figura 5.17.	Laminado BJ - MEV da seção transversal na compressão uniaxial.	87
Figura 5.18.	Fotoxidação do Laminado BJ-E: a) Face oposta ao envelhecimento, b) Face envelhecida e c) Espessura do CP envelhecido.	88
Figura 5.19.	Imagem macro do Laminado BJ-E: a) Face oposta ao envelhecimento; b) Face envelhecida.	89
Figura 5.20.	Imagem óptica do Laminado BJ-E: a) Face oposta ao envelhecimento; b) Face envelhecida.	89
Figura 5.21.	MEV do Laminado BJ-E: a) face oposta ao envelhecimento; b) face envelhecida; c) detalhe de furo na face envelhecida.	90
Figura 5.22.	Compósito de resina poliéster/fibra de vidro: a) face oposta ao envelhecimento; b) face envelhecida; c) detalhe da face envelhecida (Felipe R., 2012).	90
Figura 5.23.	Laminado BJ-E - Perda média de massa durante teste de envelhecimento acelerado.	91
Figura 5.24.	Diagrama de tensão versus deformação do Laminado BJ-E na tração uniaxial.	92
Figura 5.25.	Laminado BJ-E – Corpos de prova ensaiados na tração uniaxial.	93
Figura 5.26.	Laminado BJ-E - Fratura final na tração uniaxial.	94
Figura 5.27.	Laminado BJ-E – Microfissura na região de fratura final na tração uniaxial.	94
Figura 5.28.	Laminado BJ-E – Rupturas de fibras na tração uniaxial.	95
Figura 5.29.	Diagrama de tensão versus deflexão do Laminado BJ-E.	95
Figura 5.30.	Laminado BJ-E – Seção longitudinal na flexão em três pontos.	96
Figura 5.31.	Laminado BJ-E – Fratura final na flexão em três pontos.	97
Figura 5.32.	Laminado BJ-E - Fratura coesiva no tecido de juta.	97
Figura 5.33.	Laminado BJ-E - Rupturas de fibras e fraturas adesivas na região de fratura final na flexão em três pontos.	98

Figura 5.34.	Diagrama comparativo de tensão versus deformação: laminado BJ x laminado BJ-E na tração uniaxial.	99
Figura 5.35.	Comparativo: Laminado BJ x laminado BJ-E na tensão última.	99
Figura 5.36.	Comparativo: Laminado BJ x laminado BJ-E no módulo de elasticidade.	100
Figura 5.37.	Comparativo: Laminado BJ x laminado BJ-E na deformação de ruptura.	100
Figura 5.38.	Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: laminado BJ x laminado BJ-E na flexão em três pontos.	101
Figura 5.39.	Comparativo: laminado BJ x laminado BJ-E na Tensão Máxima.	102
Figura 5.40.	Comparativo: laminado BJ x laminado BJ-E no módulo de elasticidade na flexão.	102
Figura 5.41.	Comparativo: laminado BJ x laminado BJ-E na deflexão máxima.	103
Figura 6.1.	Presenças de bolhas superficiais na face e na seção longitudinal do painel BMJ.	105
Figura 6.2.	Painel BMJ - Seção longitudinal.	106
Figura 6.3.	Diagrama tensão versus deformação do Painel BMJ na tração uniaxial.	107
Figura 6.4.	Corpos de prova fraturados na tração uniaxial do painel BMJ.	109
Figura 6.5.	Área de concentração de microfissuras do painel BMJ após ensaio de tração uniaxial.	109
Figura 6.6.	Painel BMJ - Região de fratura final na tração uniaxial.	110
Figura 6.7.	Painel BMJ - Falha na interface com ampliação da microfissura	110
Figura 6.8.	Painel BMJ - Região de fratura final na tração uniaxial (MEV).	111
Figura 6.9.	Painel BMJ na tração uniaxial: a) Fraturas adesiva e coesiva na matriz; b) Ruptura de fibras.	111
Figura 6.10.	Diagrama de tensão versus deflexão do Painel BMJ.	112
Figura 6.11.	Painel BMJ - Região de fratura final na Flexão em três pontos.	113
Figura 6.12.	Painel BMJ - Fratura final na flexão em três pontos	113
Figura 6.13.	Painel BMJ - Microfissura na camada do tecido de fibras de juta na flexão em três pontos.	114
Figura 6.14.	Painel BMJ - Microfissura na região tracionada na flexão em três pontos.	114
Figura 6.15.	Painel BMJ – a) Fenda originada na fratura por flexão; b) Ruptura de fibras de juta na região de fratura final.	115
Figura 6.16.	Diagrama de tensão versus deformação do Painel BMJ na compressão uniaxial.	115
Figura 6.17.	Processo de delaminação na fratura final na compressão do Painel BMJ.	117
Figura 6.18.	Fratura das camadas tracionadas de tecido de juta - Compressão do Painel BMJ.	117
Figura 6.19.	Painel BMJ - Região de fratura final na compressão uniaxial.	118
Figura 6.20.	Painel BMJ - Delaminação na compressão uniaxial.	118
Figura 6.21.	Painel BMJ - Formação de fenda transversal com microfissuras na compressão.	119
Figura 6.22.	Painel BMJ - Ruptura de fibras de juta na compressão uniaxial.	119
Figura 6.23.	Fotoxidação do painel BMJ-E: a) Face oposta ao envelhecimento, b) Face envelhecida e c) Espessura do CP envelhecido.	120
Figura 6.24.	Face envelhecida do painel BMJ-E com presença de filamentos do tecido de juta desprendido da resina.	121
Figura 6.25.	MEV do Painel BMJ: a) Face oposta ao envelhecimento; b) Face envelhecida; c) detalhe de microfissuras da face envelhecida.	121

Figura 6.26.	Painel BMJ-E Perda média de massa após radiação UV e vapor aquecido.	122
Figura 6.27.	Diagrama de tensão versus deformação do Painel BMJ-E na tração uniaxial.	124
Figura 6.28.	Painel BMJ-E – Corpos de prova fraturados na tração uniaxial.	125
Figura 6.29.	Painel BMJ-E - Fratura final na tração uniaxial.	125
Figura 6.30.	Painel BMJ-E - Superfície e seção longitudinal (espessura) na tração uniaxial.	126
Figura 6.31.	Painel BMJ-E: a) Fenda originada no tecido de juta na tração uniaxial; b) Microfissura originada na região oposta ao envelhecimento.	126
Figura 6.32.	Painel BMJ-E - Núcleo na região de fratura final na tração uniaxial.	127
Figura 6.33.	Diagrama de tensão versus deflexão do Painel BMJ-E.	128
Figura 6.34.	Seção longitudinal (espessura do CP) na flexão em três pontos do painel BMJ-E.	129
Figura 6.35.	Fratura final na flexão em três pontos do painel BMJ-E.	129
Figura 6.36.	Fratura do Painel BMJ-E – Detalhe da ruptura de fibras de juta.	130
Figura 6.37.	Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painel BMJ x Painel BMJ-E na tração uniaxial.	131
Figura 6.38.	Comparativo: Painel BMJ x painel BMJ-E na tensão última.	132
Figura 6.39.	Comparativo: Painel BMJ x painel BMJ-E no módulo de elasticidade.	132
Figura 6.40.	Comparativo: Painel BMJ x painel BMJ-E na deformação de ruptura.	132
Figura 6.41.	Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: Painel BMJ x Painel BMJ-E na flexão em três pontos.	133
Figura 6.42.	Comparativo: Painel BMJ x painel BMJ-E na tensão máxima.	134
Figura 6.43.	Comparativo: Painel BMJ x painel BMJ-E no módulo de elasticidade (flexão).	134
Figura 6.44.	Comparativo: Painel BMJ x painel BMJ-E na deflexão máxima.	135
Figura 6.45.	Painel BMJ-U - Absorção de umidade com água destilada.	136
Figura 6.46.	Painel BMJ-U - Absorção de umidade com água do mar.	137
Figura 6.47.	Painel BMJ-U - comparativo de absorção de umidade.	138
Figura 6.48.	Diagrama de tensão versus deformação do Painel BMJ-U na tração uniaxial.	139
Figura 6.49.	Painel BMJ-U (água destilada) - Corpos de prova na tração uniaxial.	140
Figura 6.50.	Painel BMJ-U - Fratura final na tração uniaxial.	140
Figura 6.51.	Painel BMJ-U (água destilada) – Dano interno na mecha do tecido de juta.	141
Figura 6.52.	Painel BMJ-U - Núcleo na tração uniaxial.	141
Figura 6.53.	Diagrama de tensão versus deflexão do Painel BMJ-U (água destilada).	142
Figura 6.54.	Painel BMJ-U - Seção longitudinal na flexão em três pontos.	143
Figura 6.55.	Painel BMJ-U - Fratura final na flexão em três pontos.	144
Figura 6.56.	Painel BMJ-U - Delaminação na interface com o núcleo.	144
Figura 6.57.	Painel BMJ-U – Microfissura na flexão em três pontos.	145
Figura 6.58.	Painel BMJ-U – Tipos de fraturas presentes na flexão em três pontos.	145
Figura 5.59.	Painel BMJ-U – Desaderência nos resíduos de madeira /resina na flexão em três pontos.	146
Figura 6.60.	Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painel BMJ x Painel BMJ-U na tração uniaxial.	147

Figura 6.61.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-U na tensão última.	147
Figura 6.62.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-U no módulo de elasticidade.	148
Figura 6.63.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-U na deformação de ruptura.	148
Figura 6.64.	Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: Painei BMJ x Painei BMJ-U na flexão em três pontos.	149
Figura 6.65.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-U na tensão máxima.	150
Figura 6.66.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-U no módulo de elasticidade (flexão).	150
Figura 6.67.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-U na deflexão máxima.	150
Figura 7.1.	Painei BMJ-R - Distribuição espacial na seção longitudinal.	153
Figura 7.2.	Painei BMJ-R - Distribuição das fibras de juta no interior do núcleo híbrido.	154
Figura 7.3.	Diagrama de tensão versus deformação do Painei BMJ-R na tração uniaxial.	155
Figura 7.4.	Painei BMJ-R - Corpos de prova na tração uniaxial.	156
Figura 7.5.	Painei BMJ-R: a) Face; b) Seção longitudinal na tração uniaxial.	156
Figura 7.6.	Painei BMJ-R - Fratura final na tração uniaxial.	157
Figura 7.7.	Diagrama de tensão versus deflexão do Painei BMJ-R.	158
Figura 7.8.	Painei BMJ-R - Seção longitudinal da região de fratura final na Flexão em três pontos.	159
Figura 7.9.	Painei BMJ-R - Fratura final na flexão em três pontos.	159
Figura 7.10.	Painei BMJ-R – Danos na seção transversal na flexão em três pontos.	160
Figura 7.11.	Diagrama de tensão versus deformação do Painei BMJ-R na compressão uniaxial.	160
Figura 7.12.	Corpos de prova fraturados na compressão do painei BMJ-R.	162
Figura 7.13.	Painei BMJ-R: a) Núcleo antes da fratura; b) núcleo após a fratura na compressão uniaxial.	162
Figura 7.14.	Fratura interna no núcleo híbrido do painei BMJ-R.	163
Figura 7.15.	Fratura coesiva no núcleo híbrido do painei BMJ-R.	163
Figura 7.16.	Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painei BMJ x Painei BMJ-R na tração uniaxial.	164
Figura 7.17.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R na tensão última.	165
Figura 7.18.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R no módulo de elasticidade.	165
Figura 7.19.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R na deformação de ruptura.	165
Figura 7.20.	Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: Painei BMJ x Painei BMJ-R na flexão em três pontos.	166
Figura 7.21.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R na tensão máxima.	167
Figura 7.22.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R no módulo de elasticidade (flexão).	167
Figura 7.23.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R na deflexão máxima.	168
Figura 7.24.	Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painei BMJ x Painei BMJ-R na compressão uniaxial.	169
Figura 7.25.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R na tensão máxima (compressão).	169
Figura 7.26.	Comparativo: Painei BMJ x painei BMJ-R no módulo de elasticidade (compressão).	170

Figura 7.27.	Comparativo: Paineis BMJ x paineis BMJ-R na deformação máxima (compressão).	170
Figura 8.1.	Relação entre tipos de fratura dos biocompósitos originais na tração uniaxial.	173
Figura 8.2.	Relação de tipos de fratura entre biocompósitos na flexão em três pontos.	174
Figura 8.3.	Relação de tipos de fratura entre biocompósitos na compressão uniaxial.	174
Figura 8.4.	Relação de tipos de fratura entre biocompósitos envelhecidos na tração uniaxial.	175
Figura 8.5.	Relação de tipos de fratura entre biocompósitos envelhecidos na flexão em três pontos.	176
Figura 8.6.	Variação entre propriedades dos biocompósitos originais na tração uniaxial.	177
Figura 8.7.	Variação entre propriedades dos biocompósitos originais na flexão em três pontos.	177
Figura 8.8.	Variação entre propriedades dos biocompósitos originais na compressão uniaxial.	178
Figura 8.9.	Resistência residual e módulo de elasticidade residual dos biocompósitos envelhecidos na tração uniaxial.	179
Figura 8.10.	Resistência residual e módulo de elasticidade residual dos biocompósitos envelhecidos na flexão em três pontos.	179
Figura 8.11.	Comparativo global do desempenho mecânico dos biocompósitos.	180
Figura 8.12.	Perda de massa entre a resina náutica e biocompósitos envelhecidos após exposição de radiação ultravioleta.	181
Figura 8.13.	Perda de massa entre a resina náutica e biocompósitos envelhecidos após exposição de vapor aquecido.	182

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Aplicações comuns para a resina náutica com NPG (Adaptado do Guia Reichhold, 2012).	15
Tabela 2.2.	Composição média da fibra de juta (Mohanty e Misra, 1995) (Banco de dados da BPMCC – DEM/UFRN, 2008)	24
Tabela 2.3.	Propriedades mecânicas da fibra de juta (Banco de dados da BPMCC – DEM/UFRN, 2008) (Callister Jr., 2008).	24
Tabela 3.1.	Características da resina náutica RESAPOL 10134 (Adaptado do Boletim técnico Reichhold, 2000).	43
Tabela 3.2.	Concentrações recomendadas para uso da resina náutica RESAPOL 10134 (Adaptado do Boletim Técnico Reichhold, 2000).	43
Tabela 3.3.	Dimensões médias dos corpos de prova para os ensaios de tração uniaxial.	59
Tabela 3.4.	Dimensões médias dos corpos de prova para os ensaios de flexão em três pontos.	60
Tabela 3.5.	Dimensões médias dos corpos de prova para os ensaios de compressão uniaxial.	62
Tabela 3.6.	Dimensões médias dos corpos de prova para os ensaios de umidade.	63
Tabela 3.7.	Dados dos ciclos de envelhecimento ambiental acelerado.	67
Tabela 4.1.	Propriedades mecânicas da RN+NPG na tração uniaxial.	70
Tabela 4.2.	Propriedades mecânicas da RN+NPG na flexão em três pontos.	71
Tabela 4.3.	Comparativo entre propriedades mecânicas da RN+NPG registradas em ensaio e segundo dados do fabricante.	71
Tabela 4.4.	Perda percentual de massa do painel RN+NPG pós-irradiação ultravioleta.	73
Tabela 4.5.	Perda percentual de massa do painel RN+NPG pós-vapor aquecido.	73
Tabela 5.1.	Densidade volumétrica média do laminado BJ.	77
Tabela 5.2.	Propriedades mecânicas do laminado BJ na tração uniaxial.	78
Tabela 5.3.	Propriedades mecânicas do laminado BJ na flexão em três pontos.	82
Tabela 5.4.	Propriedades mecânicas do painel BJ na compressão uniaxial.	85
Tabela 5.5.	Perda percentual de massa do laminado BJ-E pós-irradiação ultravioleta.	91
Tabela 5.6.	Perda percentual de massa do laminado BJ-E pós-vapor aquecido.	92
Tabela 5.7.	Propriedades mecânicas do laminado BJ-E na tração uniaxial.	93
Tabela 5.8.	Propriedades mecânicas do laminado BJ-E na flexão em três pontos.	96
Tabela 5.9.	Variação de propriedades mecânicas do laminado BJ-E na tração uniaxial.	100
Tabela 5.10.	Variação de propriedades mecânicas do laminado BJ-E na flexão em três pontos.	103
Tabela 6.1.	Densidade volumétrica média do painel BMJ.	106
Tabela 6.2.	Propriedades mecânicas do painel BMJ na tração uniaxial.	108
Tabela 6.3.	Propriedades mecânicas do painel BMJ na flexão em três pontos.	112
Tabela 6.4.	Propriedades mecânicas do painel BMJ na compressão uniaxial.	116
Tabela 6.5.	Perda percentual de massa do painel BMJ-E pós-irradiação ultravioleta.	123
Tabela 6.6.	Perda percentual de massa do painel BMJ-E pós-vapor aquecido.	123

Tabela 6.7.	Propriedades mecânicas do painel BMJ-E na tração uniaxial.	124
Tabela 6.8.	Propriedades mecânicas do painel BMJ-E na flexão em três pontos.	128
Tabela 6.9.	Variação de propriedades mecânicas do painel BMJ-E na tração uniaxial.	133
Tabela 6.10.	Variação de propriedades mecânicas do painel BMJ-E na flexão em três pontos.	135
Tabela 6.11.	Propriedades mecânicas do painel BMJ-U saturado em água destilada na tração uniaxial.	139
Tabela 6.12.	Propriedades mecânicas do painel BMJ-U saturado em água destilada na flexão em três pontos.	143
Tabela 6.13.	Variação de propriedades mecânicas do painel BMJ-U na tração uniaxial.	148
Tabela 6.14.	Variação de propriedades mecânicas do painel BMJ-U na flexão em três pontos.	151
Tabela 7.1.	Densidade volumétrica média do painel BMJ-R.	154
Tabela 7.2.	Propriedades mecânicas do painel BMJ-R na tração uniaxial.	155
Tabela 7.3.	Propriedades mecânicas do painel BMJ-R na flexão em três pontos.	158
Tabela 7.4.	Propriedades mecânicas do painel BMJ-R na compressão uniaxial.	161
Tabela 7.5.	Variação de propriedades mecânicas do painel BMJ-R na tração uniaxial.	166
Tabela 7.6.	Variação de propriedades mecânicas do painel BMJ-R na flexão em três pontos.	168
Tabela 7.7.	Variação de propriedades mecânicas do painel BMJ-R na compressão uniaxial.	170

## RESUMO

---

Os biocompósitos necessitam atender às condições gerais de serviço com mínimas mudanças de propriedades ao longo de seu ciclo de vida, para servir satisfatoriamente aos interesses produtivos industriais. Assim esta tese objetiva desenvolver novos materiais biocompósitos de matriz polimérica, obtidos a base de resina poliéster com Neopentil Glicol (NPG), denominada de resina náutica. Os biocompósitos têm por reforços resíduos de madeira e tecidos bidirecionais de fibras de juta. Inicialmente duas configurações foram confeccionadas industrialmente por laminação manual. O laminado **BJ**, na forma de quatro camadas de tecido de juta e o painel **BMJ** no formato sanduiche, com quatro camadas de tecido de juta e uma camada intermediária (núcleo) com resíduos de madeiras embebidas em resina náutica foram submetidas ao processo de envelhecimento ambiental acelerado com ciclos de radiação UV e de umidade por vapor aquecido, através de câmara construída em projeto da DCR/CNPq seguindo norma ASTM G 53 - 96. Após o envelhecimento os corpos de prova do painel **BMJ** e do laminado **BJ** foram processados e reciclados dando origem a uma terceira configuração, o painel **BMJ-R** (reciclado) contendo quatro camadas de tecido de juta e um núcleo híbrido com resíduos de madeira e fibras trituradas de juta e embebidas em resina náutica. As configurações em estado original e reciclada passaram por ensaios mecânicos de tração, flexão e compressão e ensaios físicos de densidade volumétrica. O painel **BMJ** também passou pelo ensaio de absorção de umidade em dois ambientes: água destilada e água do mar. Os biocompósitos envelhecidos e corpos de prova de resina náutica não reforçada **RN+NPG** passaram por ensaios mecânicos de tração e flexão em três pontos e pela avaliação da deterioração por perda de massa após o envelhecimento para observar de que modo a configuração e a presença de um núcleo influenciam tais materiais e em quais aspectos. As amostras de resina náutica funcionaram como parâmetro comparativo da contribuição da mesma no desempenho dos biocompósitos produzidos, frente às intempéries estudadas. Análises comparativas das características da fratura, dos desempenhos mecânicos antes e após o envelhecimento, do processo de reciclagem e da integridade estrutural foram realizadas para se formar uma compreensão global da influência das diversas configurações e fatores, no comportamento mecânico dos biocompósitos poliméricos.

**Palavras Chaves:** Biocompósito, Resina Náutica, Envelhecimento Acelerado, Reciclagem, Retenção de Propriedades e Fratura Mecânica.



## ABSTRACT

---

Biocomposites need to attempt to general service conditions with minimal changes of properties through its life cycle to serve satisfactorily for industrial interests. So this thesis intends to develop a new polymeric biocomposite made from polyester isophthalic resin with Neopentyl Glycol (NPG) as matrix, named nautical resin. This biocomposite is filled by wood flour and untreated woven jute-fabric. First of all, two configurations were produced by industrial hand lay-up. The **BJ** laminate, with four jute-fabric layers and **BMJ** sandwich panel, with four jute-fabric layers and an intermediate layer (nucleon) by wood flour and nautical resin were subject to accelerated ageing process with UV radiation and humidity cycles, through accelerated test device building by DCR/CNPq according to ASTM G 53 – 96. After ageing the **BMJ** panel and **BJ** laminate body-proofs were processed and recycled to produce a third configuration, named **BMJ-R** panel (recycled) which contains four jute-fabric layers and an intermediate hybrid nucleon with wood flour and jute fibers grinded into nautical resin. The non-aged and recycled configurations were passed by tensile, flexural and compression mechanical properties tests and physical test of volumetric density. **BMJ** panel passed again for two ambient water absorption tests: distilled and sea water. Aged biocomposites and **RN+NPG** (nautical resin) body-proofs passed by tensile and flexural mechanical properties tests and were analyzed by mass loss degradation after ageing test to observe how its configuration and nucleon presence may influence that materials and in which aspects. The nautical resin samples work as a comparative parameter for contribution to biocomposites performance face to studied interpenetrating factors. Analyses of fracture comparative, mechanical performance, before and after ageing, recycling processes and the structural integrity were realized to form the global understanding about the influence of the different configurations and factors into polymeric biocomposites made here.

**Key words:** Biocomposite, Nautical Resin, Natural Fillers, Accelerated Ageing, Recycling, Residual Properties and Mechanical Fracture.

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

---

O interesse em desenvolver compósitos com menor impacto ambiental decorreu da preocupação de membros da comunidade científica, de governantes e da sociedade em reduzir o impacto ambiental que, segundo a Agência Europeia do Ambiente (E. E. A., 2012) a produção e o descarte de produtos não recicláveis ou não degradáveis podem estar provocando alterações climáticas, a poluição de alimentos, deterioração de leitos de rios e terras, os quais comprometem a qualidade de vida no planeta.

A evolução das técnicas de processamento desses materiais corre em paralelo ao aumento das áreas para sua aplicação. Biocompósitos têm sido utilizados nos setores automotivos, na construção civil e militar, de eletro-componentes, equipamentos de uso doméstico, produtos de consumo (embalagens), no setor esportivo e aeroespacial. Sua importância econômica pode ser medida pela elevação nas projeções de demanda mundial ao longo das próximas décadas (Material Thoughts, 2002) (Dias, 2006).

No Brasil, a investigação do uso de reforços de origem vegetal vem obtendo destaque por se tratarem de fontes renováveis e disponíveis em grande quantidade no país. Existe uma enorme gama de fibras naturais com potencial para obtenção de propriedades físicas e mecânicas desejáveis para uso industrial (Marinelli, 2008). Compósitos reforçados por estas fibras são considerados menos agressivos ao meio ambiente, apresentam baixo custo de aquisição e fabricação em relação aos reforços sintéticos atualmente empregados e podem representar uma nova fonte de renda para a população rural do nordeste brasileiro (Aquino *et al.*, 2008).

Para servir satisfatoriamente aos interesses produtivos industriais, os biocompósitos assim como qualquer outro material, necessitam atender às condições gerais de serviço com mínimas mudanças de propriedades ao longo de seu ciclo de vida. Para se prever por quanto tempo um biocompósito manterá suas características e propriedades em perfeitas condições de serviço, é determinante utilizar os testes de envelhecimento acelerado para conhecer os mecanismos que afetam sua degradação e que comprometem a aplicação industrial destes materiais.

Ao passo que avançam as pesquisas sobre tais materiais, surgem diversas técnicas adicionais para a melhoria de suas propriedades. A adição de elementos auxiliares que

facilitem a processabilidade ou ainda que os protejam diante das intempéries que dificultam as condições de serviço, permitem a produção de novos materiais mais estáveis e menos suscetíveis a deterioração por fatores ambientais.

Este projeto de doutoramento tem a meta principal de desenvolver biocompósitos poliméricos, optando pela resina náutica (poliéster isoftálica aditivada por Neopentil Glicol) como matriz, uma vez que a mesma é considerada de maior resistência aos fatores ambientais de radiação ultravioleta, temperaturas elevadas e umidade (Peters, 1998) (Reichhold, 2012). Neste sentido, se cria possibilidades de ser aplicada na confecção de acessórios submetidos a ambientes expostos a intempéries, incluindo-se o setor náutico.

Inicialmente duas configurações de biocompósitos (laminado e painel sanduíche) foram desenvolvidas e submetidas ao processo de envelhecimento ambiental no modo acelerado, após serem confeccionados industrialmente. O biocompósito do tipo laminado foi confeccionado na forma de 04 (quatro) camadas de tecido bidirecional de fibras de juta. O mesmo foi definido como **laminado BJ**. Já o biocompósito na forma de painel sanduíche possui quatro camadas de tecido bidirecional de fibras de juta e uma camada central (núcleo) constituída de resíduos de madeira, sendo definido como **painel BMJ**.

Para os biocompósitos no estado original (sem terem sido expostos ao envelhecimento), foram confeccionados corpos de provas para determinação das propriedades mecânicas de tração e compressão uniaxial, flexão em três pontos e de propriedades físicas por meio do ensaio de densidade volumétrica. As configurações envelhecidas (laminado **BJ**, painel **BMJ** e a resina náutica não reforçada) foram ensaiadas quanto às propriedades mecânicas de tração uniaxial e flexão em três pontos.

A integridade estrutural dos biocompósitos foi avaliada assim como sua deterioração por perda de massa observando as possíveis perdas e/ou ganhos em suas propriedades mecânicas durante e após o teste de envelhecimento. Este estudo também foi desenvolvido com relação ao comportamento mecânico do painel **BMJ** após envelhecimento por absorção de umidade, tanto em água salgada quanto em água destilada, e na forma mais agressiva de exposição, ou seja, a da imersão do material. Esse comportamento foi comparado, em sequência, ao do biocompósito no estado original.

Após o processo de envelhecimento ambiental e da realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova dos biocompósitos foram reprocessados para confecção da terceira configuração no formato de painel, mantendo a mesma configuração do painel

original, exceto pela formação de um núcleo híbrido, ou seja, composto por resíduos de madeira e fibras de juta, ambos reprocessados. Este novo biocompósito passou pelos mesmos ensaios físicos e mecânicos realizados para as duas configurações iniciais.

Concluída toda a parte experimental referente aos ensaios mecânicos, foi realizada uma série de análises em níveis macroscópicos e microscópicos da caracterização da fratura mecânica dos biocompósitos e da resina náutica para todas as condições de ensaios. Por último, foi realizada a avaliação global das propriedades mecânicas quanto à influência do tipo de configuração e do processo de reciclagem.

### **1.1. Contribuição Científica**

Este trabalho possui diversas contribuições científicas originais: o desenvolvimento de diferentes configurações de biocompósitos com a utilização da resina náutica com NPG, o envelhecimento ambiental acelerado destes, o processo de reciclagem de compósitos de matriz termofixa, assim como uma sequência de testes e análises ainda inéditas para tais materiais. As respostas a estas indagações possibilitam o incremento das cadeias produtivas envolvidas com o uso destes biocompósitos, oferecendo um material não convencional com menor impacto ao meio ambiente e que possibilita a redução do depósito de resíduos vegetais em nossos meios urbanos, na forma de lixo.

### **1.2. Objetivo Geral**

Desenvolver novos materiais biocompósitos poliméricos, na forma de painéis e de laminados. Os mesmos são obtidos a base de resina poliéster com Neopentil Glicol, denominada de resina náutica, e possuem como reforços, resíduos de madeira e tecidos bidirecionais de fibras de juta. O desempenho mecânico é analisado bem como a sua integridade estrutural após os mesmos serem submetidos às condições de envelhecimento ambiental acelerado. O processo de reciclagem dos biocompósitos envelhecidos é empregado na concepção de um novo biocompósito.

### **1.3. Objetivos Específicos**

- Desenvolver biocompósitos na forma de laminados visando à aplicação como envoltória para equipamentos de monitoramento ambiental;

- Desenvolver biocompósitos na forma de painéis do tipo sanduíche visando à aplicação como painel de revestimento e divisórias em ambientes internos e/ou externos sob a ação de intempéries;
- Viabilizar o processo de reciclagem desses biocompósitos envelhecidos na concepção de novos painéis do tipo sanduíche;
- Analisar o comportamento físico e mecânico desses biocompósitos em estado original, ou seja, sem a influência do envelhecimento ambiental, através dos ensaios de densidade volumétrica e dos ensaios mecânicos de tração e compressão uniaxial e de flexão em três pontos;
- Verificar o desempenho mecânico da resina náutica com Neopentil Glicol em estado original nos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos para determinar sua influência no comportamento dos biocompósitos.
- Estudar através de uma análise comparativa a influência do tipo de configuração, caracterizada pela presença de um núcleo nas propriedades mecânicas, no processo de deterioração e na característica da fratura;
- Estudar o comportamento mecânico dos biocompósitos poliméricos desenvolvidos a partir dos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos após os mesmos serem expostos ao processo de envelhecimento ambiental acelerado, caracterizado pela exposição cíclica de radiação ultravioleta e vapor aquecido;
- Estudar e analisar os mecanismos de fratura presentes em cada biocompósito tanto em estado original quanto envelhecido para cada ensaio mecânico realizado;
- Medir a deterioração por perda de massa dos biocompósitos poliméricos assim como da resina não reforçada utilizada como matriz e analisar qual a interferência dos fatores de envelhecimento para a degradação destes materiais;
- Estudar os efeitos da saturação por umidade no biocompósito na forma de painel quando imersos em meios de água salgada e destilada, observando de que modo a resina náutica contribui neste processo;
- Realizar um estudo comparativo de desempenho mecânico entre os biocompósitos em estado original e reciclado e de retenção das propriedades mecânicas (propriedades residuais) dos biocompósitos expostos tanto pelo envelhecimento ambiental acelerado como pela saturação no meio aquático mais agressivo, em relação aos mesmos no estado original.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 2.1. Materiais Compósitos e os Biocompósitos

O ser humano sempre buscou encontrar na natureza recursos que permitissem a ele uma melhor qualidade de vida. Os materiais dispostos na natureza foram utilizados, transformados e aperfeiçoados, ao longo dos séculos, de acordo com a necessidade, e posterior conveniência do homem (Gomes, 2003). Entretanto o uso demasiado de materiais resistentes ao desgaste natural ou não recicláveis, como é o caso dos derivados fósseis, levou pesquisadores a uma nova investida rumo ao desenvolvimento de materiais, que além de úteis na confecção e composição de objetos, sejam aptos a oferecer aplicações com um menor risco ao meio ambiente.

Nesse contexto, os materiais compósitos podem atender a variados tipos de demanda, em termos de aplicação industrial e no atendimento às causas ambientais. Os mesmos são caracterizados pela união física e/ou química de dois ou mais elementos, uma matriz e um reforço capazes de permanecerem distintos, mas mecanicamente separáveis e fabricados de modo a controlar a proporção de cada componente. Compósitos em geral são capazes de oferecerem propriedades específicas que não seriam alcançadas por cada um de seus componentes quando constituídos separadamente (ASTM D3878-95).

Sendo materiais multifásicos, os compósitos são desenvolvidos a partir do princípio da ação combinada de propriedades. Suas fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e estarem separadas por uma interface. A qualidade da interface é um fator decisivo para que ocorra a interação entre os componentes (Mano, 1991). Esta região de transição química e física em um compósito pode apresentar três fases: a superfície do reforço, a interface entre o reforço e a matriz, que pode ser direta ou intermediada por um material adesivo ou facilitador da adesão, além da própria superfície da matriz, que poderá ser constituída por qualquer material com característica de continuidade e envolvimento do reforço. O desempenho desta região dependerá da configuração do compósito, da estrutura em torno da interface e das propriedades físicas e químicas dos constituintes (Yosomiya, 1989).

A maioria dos compósitos é desenvolvida para melhorar as características mecânicas, no entanto os mesmos podem ser também, desenvolvidos com propriedades e aplicações específicas. Tecnicamente, porém, os compósitos reforçados por fibras são considerados os mais importantes. Tais materiais incluem com frequência resistência e/ou rigidez elevada, medidos por meio da razão entre o limite de resistência a tração em relação à densidade relativa do material, constituindo respectivamente resistência e módulo específico (Callister Jr., 2002).

Os materiais compósitos que mais atendem as propriedades específicas podem ser classificados como: a) compósitos verdes ou biocompósitos – são os que apresentam menor impacto ambiental, produzidos a partir de uma matriz polimérica sintética, renovável ou com característica de biodegradabilidade combinada com fibras renováveis ou naturais; e b) os compósitos híbridos que formam a classe configurada a partir de uma mistura de fibras sintéticas e/ou naturais modificadas (John e Thomas, 2008).

Na ciência dos materiais, a caracterização é o passo inicial para rápida identificação das propriedades físicas que poderão ser encontradas na amostra verificada. Uma eficaz caracterização supõe posteriores classificações que não devem apresentar discordâncias, a fim de orientar o pesquisador, projetista e/ou empreendedor na sua aplicação e na definição de quais requisitos e/ou restrições o novo material apresentará. Esta recomendação básica encontra sérios obstáculos para serem seguidas quando se trata de biocompósitos, pela simples razão de que desde que foram iniciadas as pesquisas para o desenvolvimento deste tipo de material, foram propostos diversos diferentes nomes, ora simples, ora compostos, para cada estudo, modificação ou avanço realizado, deixando registrados ao longo de décadas, muitos termos para compósitos que poderiam ser descritos como semelhantes.

O primeiro termo utilizado para identificar a formação de compósitos mesclando elementos sintéticos e naturais foi de plásticos reforçado com fibras, aplicado no início do século passado para descrever diversos experimentos realizados entre resinas fenólicas combinadas com a celulose. A repetida utilização da celulose processada ou como fibras em diversos outros compósitos ao longo das décadas seguintes, originaram o termo de compósitos de fibras celulósicas. A efusão destes novos materiais fez surgir novos e distintos termos: biopolímeros, bioplásticos, polímeros reforçados por biofibras, polímeros biodegradáveis, compósitos eco-friendly, compósitos verde (*green composites*), plásticos celulósicos e plásticos bioderivados (Mishra *et al.*, 2002) (Nam e Netravali, 2006) (Avérous e Le Digabel, 2006) (John e Thomas, 2008) (Huang e Netravali, 2009).



Logicamente o uso de termos que fazem referência a nomes que recentemente ganharam popularidade quanto a sua relação com aspectos ambientais, tais como *eco-green* e *eco-friendly*, remete a aspectos de preocupação com a degradação de materiais, sua decomposição, reciclagem, reutilização, assim como na identificação do uso inteligente de recursos naturais, contudo tais aspectos de entendimento de natureza subjetivos não substituem a necessidade de uma unidade terminológica.

Para tanto, este trabalho de investigação adotará as definições oriundas do estudo etimológico CEN-standard – *Plastics: Recommendation for Terminology and Characterisation of Biopolymers and Bioplastics*, resultado do 203º Comitê Europeu de Normatização, realizado em novembro de 2010 na cidade de Bruxelas na Bélgica, que contou com a participação de membros de 31 países da União Europeia. A CEN-standard propôs uma organização inicial para normatizar as terminologias utilizadas em polímeros e derivados, preferindo adotar o mesmo conceito que Mohanty *et. al.* utilizou em 2001, no qual basta que o compósito tenha ao menos um de seus constituintes proveniente de fonte natural para que seja considerado um biocompósito (CEN-standard TR 15932:2010).

Os biocompósitos apresentam, em geral, vantagens de requerer simplificados métodos de processamento, advir de uma ampla e diversificada fonte como pode ser visto na figura 2.1, podendo ser obtidos com baixo custo e serem capazes de resultar em baixa densidade, propriedades específicas de interesse industrial, reduzido gasto energético, menor impacto ambiental e, por vezes, características estéticas originais. A versatilidade de suas combinações fez, ao longo de anos, surgirem subclasses classificadas segundo sua origem e/ou função.



Figura 2.1. Amostras de materiais utilizados na produção de biocompósitos (Jetson Green, 2012).



Para Mohanty *et al.* (2005) os biocompósitos subdividem-se em parcialmente ecologicamente amigáveis - *Partly ecofriendly* e biocompósitos verde ou ecologicamente amigáveis (*green/ecofriendly*). A principal diferença entre eles seria quanto ao uso de materiais renováveis, recicláveis ou biodegradáveis apenas na matriz ou no reforço ou em toda sua composição.

O primeiro registro de um biocompósito ocorreu a mais de 3000 anos atrás, quando Egípcios combinaram argila e palha para a construção de paredes e muros de suas habitações. Tais iniciativas foram consideradas rudimentares quando a humanidade descobriu como utilizar os materiais metálicos. A retomada, mais significativa, pela busca de novos biocompósitos retornou somente no início do século XX, mas precisamente em 1908, quando foram produzidos os primeiros materiais compósitos mesclando fibras linocelulósicas com resinas sintéticas fenólicas e posteriormente ureia e melamina até o uso da resina poliéster insaturada reforçada com fibra de vidro na década de 1940 (John e Thomas, 2008) (Mohanty *et al.*, 2005).

Entre 1972 e 1973, a fim de reduzir os custos da construção de habitações, a UNIDO - *United Nations Industrial Development Organization* em parceria com a CARE – *Cooperative of American Relief Everywhere* construíram em Bangladesh uma escola fundamental com material produzido a partir da combinação da resina poliéster, com reforço de fibras naturais de juta, um material de presença abundante na região (Winfield, 1979). Entre 1976 e 1977 a mesma tecnologia fez surgir na vizinha Índia o protótipo de uma casa de baixo custo para habitação e armazenamento de grãos. Nesta década a ATI - *Appropriate Technology International* e a SCF - *Save for Child Federation* iniciaram a produção de coberturas para casas utilizando cimento com fibras naturais (Suddell e Evans, 2005).

Na década de 1980 vários experimentos germinaram em diversas regiões do planeta, dos quais dois merecem especial destaque: No primeiro experimento, painéis de 10 mm de espessura e telhas foram produzidos a partir da combinação da resina fenólica reforçada com 92% de bagaço de cana para serem testadas em moradias na Jamaica, Gana e Filipinas. Os painéis produzidos foram avaliados pela AHA - *American National Standard Institute* em 1989 (Salyer e Usmani, 1982). No segundo projeto, um trabalho experimental para o desenvolvimento de materiais de construção de baixo custo, foi empreendido pela UNIDO em associação ao Governo Mexicano. No experimento foram combinadas fibras de henequen, palma e sisal reforçando a resina de poliéster insaturado

(Belmares *et al.*, 1981). Valdez *et al* (1989) *apud* Youngquist *et al*, (1993) descreveram que os materiais desenvolvidos no México foram também experimentados e avaliados em Cuba. O Sistema de Normatização Cubano NC43 18:86, que em geral acompanha o padrão internacional, considerou como qualidade mediantemente alta 21 das 24 amostras testadas.

Os anos 1990 foram marcados pelo auge do uso de variados plásticos derivados do petróleo, todavia, um dos poucos exemplos significativos na década foi uma parceria entre o governo da Índia e a UNDP - *United Nations Development Programme* que apoiou a criação de biocompósitos e outros produtos feitos com juta para a substituição da madeira em embalagens e materiais de construção civil (Saptharish, 1992).

Apesar dos avanços, a maior parte dos compósitos combinados a materiais de origem natural, sobretudo proveniente de vegetais, foi pouco estudada, o que pode representar ao pesquisador, tanto novos desafios quanto novas possibilidades de aplicação. Apesar de demandar testes e conhecimentos sobre seu desempenho em longos períodos de tempo e em relação aos variados fatores ambientais, a capacidade de absorção industrial dos novos materiais compósitos confirma sua importância. Entre 2002 e 2005 foram registrados significativos aumentos nas aplicações de biocompósitos nos setores automotivos, na construção civil e militar, na área náutica, de eletros componentes, em equipamentos de uso doméstico, produtos de consumo (embalagens) e aeroespacial (Material Thoughts, 2002).

Para muitos pesquisadores, estes compósitos não são ainda capazes de substituir plenamente os materiais derivados de petróleo. John e Thomas (2008) consideram que mais viável economicamente seria avançar no desenvolvimento de combinações entre os dois tipos. A união de materiais renováveis e não renováveis permitem inúmeras possibilidades desde a produção de biocompósitos recicláveis, de reduzido impacto ambiental até os totalmente biodegradáveis.

## 2.2. Compósitos Laminados

Os compósitos podem, de modo geral, ser feitos de três modos: a) reforçado por partículas grandes com aproximadamente as mesmas dimensões (eixos iguais) ou por dispersão de uma fração volumétrica que interage com as discordâncias no interior da matriz; b) reforçado por fibras variadas (naturais, sintéticas ou mistas) de modo contínuo

(alinhado) ou descontínuo, com fibras curtas alinhadas ou orientadas aleatoriamente, ou c) pode ser estruturado na forma de laminado ou com formação tipo sanduíche (Callister Jr, 2002) (Hull e Cline, 1996).

Compósitos laminados são bastante comuns tanto para a composição de materiais homogêneos, quanto para biocompósitos. As propriedades resultantes dos compósitos dependem não somente das propriedades dos constituintes, mas também da configuração geométrica dos seus elementos estruturais.

Um compósito *laminado* é formado por camadas (lâminas) ou painéis bidimensionais organizados numa distribuição preferencial para obter a melhor resistência e/ou rigidez. As camadas são empilhadas e cimentadas uma sobre a outra, de modo que a orientação da direção de alta resistência variará de acordo com cada camada sucessiva, na figura 2.2, uma simulação em 3D mostra um exemplo de uma estrutura típica de um compósito laminado, as camadas transparentes de resina são apenas ilustrativas, já que estas são laminadas juntamente com os reforços. A designação dos laminados é efetuada segundo a disposição das lâminas e a orientação da lâmina com relação ao eixo de referência (Pereira, 2003).

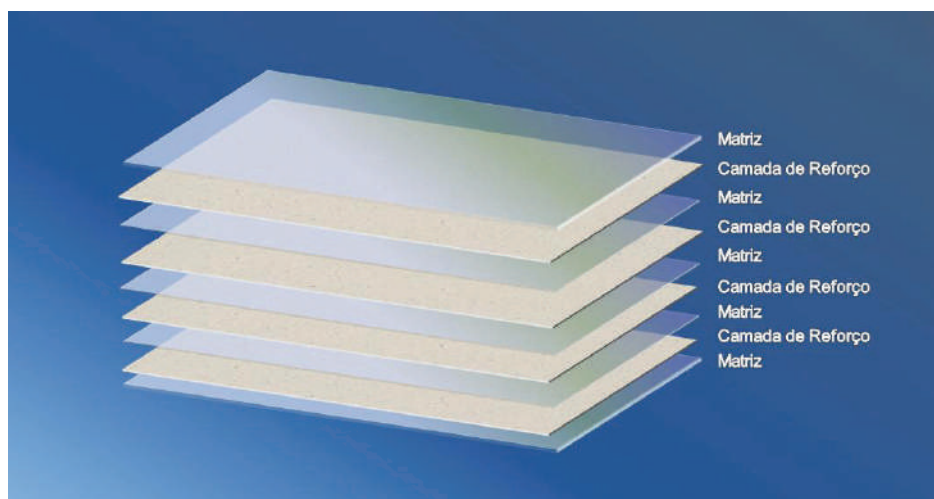


Figura 2.2. Estrutura típica de um compósito laminado.

Desta forma o compósito laminar possuirá uma resistência relativamente alta em uma diversidade de direções, entretanto, a resistência em qualquer direção específica será menor do que a obtida com todas as fibras uniformemente orientadas. Como mecanismo para aperfeiçoamento da geometria da estrutura, os biocompósitos laminados podem ser construídos empregando-se reforços na forma de tecidos (Callister Jr, 2002).

Quando é necessária mais de uma orientação de fibra, poder-se-á utilizar tecidos combinando orientações com o urdume a  $0^\circ$  e trama a  $90^\circ$ , a integridade destes tecidos mais regulares é mantido pelo entrelaçado mecânico formado pelas fibras, capazes de se adaptar a superfícies mais complexas, mantendo suas propriedades graças ao estilo da fiação (John e Thomas, 2007).

Compósitos laminados são confeccionados através de processos de baixa complexidade e baixo custo, além de apresentarem em geral boa plasticidade, o que estimula seu desenvolvimento e posterior aplicação industrial enquanto materiais substitutos. No entanto, assim como nos compósitos tipos sanduíche, os laminados apresentam diversos fatores característicos que merecem investigação, tais como a tensão interlaminar e a delaminação (Tong e Shen, 2010). Na figura 2.3 são exemplificados alguns biocompósitos laminados de fabricação industrial.



Figura 2.3. Biocompósitos laminares biodegradáveis de resina vegetal e fibras de bananeira da Fibra Design Sustentável (Ullmann, 2012).

### 2.3. Compósitos com Estrutura Sanduíche

Os compósitos com estrutura sanduíche surgiram como proposta de material em 1820, muito embora seu uso comercial tenha demorado cerca de uma centena de anos para se expandir, devido ao sucesso dos novos adesivos desenvolvidos simultaneamente no Reino Unido e Estados Unidos. Atualmente estas estruturas são largamente utilizadas em praticamente todas as aeronaves comerciais e militares, helicópteros, assim como em diversas partes de automóveis e em naves de exploração espacial. Nestes veículos encontraremos contêineres, abrigos móveis, em revestimentos e partes internas de

embarcações e pequenos botes. Sem contar em diversos materiais esportivos e de construção (Peters, 1998).

Os painéis em sanduíche são produzidos a partir de lâminas, porém são considerados como uma classe de compósitos estruturais e tratados como tipologia a parte. Consistem em duas faces externas mais resistentes, separadas por uma camada de material menos denso, em geral composto por madeira, espuma ou um material tipo colmeia (honeycomb), conhecido por núcleo ou *core*, dotado de menor resistência e rigidez. Na figura 2.4 ilustra-se a concepção usual de um compósito laminado do tipo sanduíche, com destaque para a posição do núcleo e das camadas de reforço.

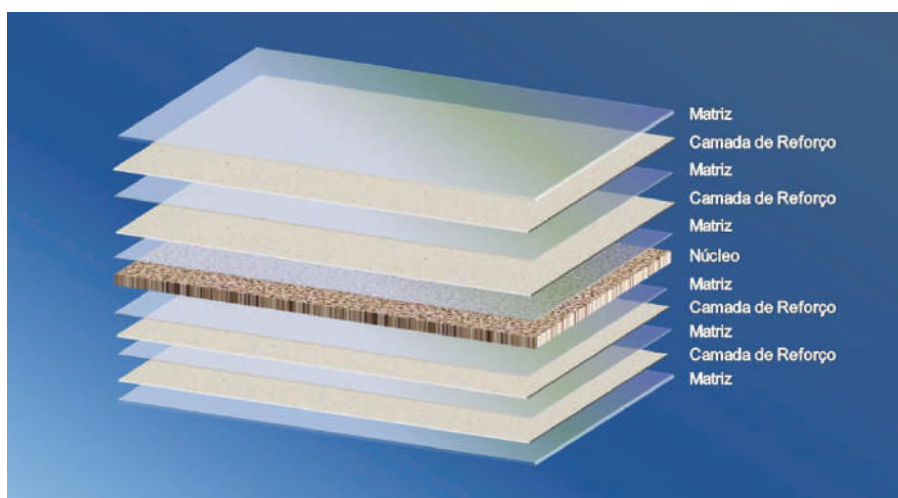


Figura 2.4. Estrutura típica de um compósito sanduíche.

Ao núcleo cabe separar as fases, oferecendo resistência às deformações perpendiculares ao plano da face, assim como também proporcionar certo grau de rigidez contra o cisalhamento ao longo dos planos. As faces suportam a maior parte da carga e quaisquer tensões de flexão transversais (Peters, 1998) (Callister Jr., 2002).

Nos compósitos a região interfacial é importante para o desempenho geral do material, no caso da estrutura tipo sanduíche, a qualidade das faces é ainda mais destacada, pois há um maior número de camadas, formada por diferentes materiais que precisam apresentar, entre os elementos imediatamente adjacentes, uma boa capacidade adesiva. Entretanto, o maior número de camadas permite melhor observar a relação entre os elementos constituintes, avaliar a qualidade da interface e investigar os efeitos causados por fatores degradantes ao material, notadamente em compósitos poliméricos que costumam absorver fluidos quando expostos em ambientes com elevado teor de umidade.



Em 2004 Xiaoming Li e Weitsman comprovaram os danos causados pela água do mar nas propriedades mecânicas em recheios de espuma PVC de compósitos laminares tipo sanduíche com matriz vinil éster. Após a imersão em água salgada por 2400 e 3600 horas, as amostras apresentaram alterações dimensionais devido à absorção de água, redução no módulo de flexão, assim como evidente delaminação, ilustrada na figura 2.5, um tipo de efeito de presença crescente, notadamente em relação ao tempo de exposição.

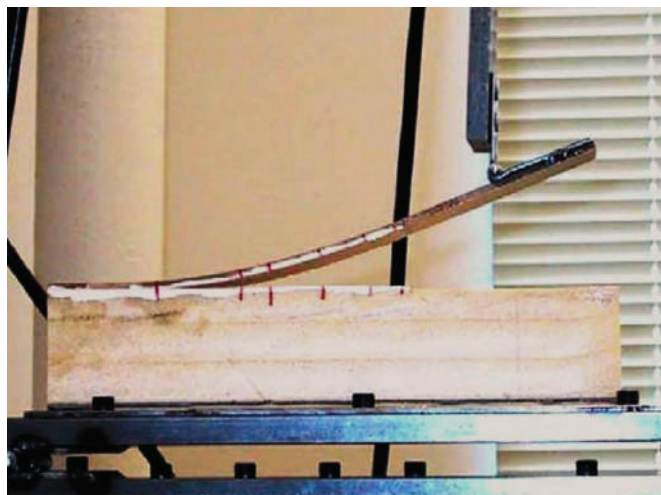


Figura 2.5. Propagação da delaminação durante ensaio em amostras H200 – PVC Foam Core (Xiaoming Li e Weitsman, 2004).

## 2.4. Resina Poliéster Náutica

A resina poliéster é a mais utilizada em matrizes para compósitos. É o resultado da reação de um ácido orgânico com um álcool. Dependendo da combinação de diácidos e glicóis poderão ser gerados diferentes composições de resina. Em geral os poliésteres apresentam ótimas propriedades elétricas e baixo custo, podendo ser formulados para uso à temperatura ambiente ou até para temperaturas mais elevadas.

As resinas poliésteres com mais uso industrial são classificadas como:

- a) ortoftálicas - resina comumente utilizada, de reduzido custo e indicada para funções mais básicas;
- b) tereftálicas - resina com resistência física pouco superior a ortoftálica, porém com baixa resistência aos efeitos dos raios ultravioleta;
- c) isoftálica - resina que apresenta melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores;
- d) bisfenólica – possui as superiores características químicas e térmicas quando comparada as demais resinas poliéster.

Existem ainda algumas outras variações que são desenvolvidas, destinada a suprir necessidades específicas como as de ácido HET que resultam em melhor resistência química, as bromadas com características anti-chama, resinas *low-profile* com baixa contração e as emulsionadas com baixo teor de estireno e com menor agressão ambiental. Na resina isoftálica com NPG - o Neopentil Glicol melhora sua resistência diante da hidrólise.

As resinas isoftálicas são produzidas a partir de um ácido isoftálico, que a caracteriza pela maior resistência térmica, dureza e flexibilidade do que as ortoftálicas. O poliéster insaturado é produzido quando qualquer dos reagentes contém insaturações. A denominação insaturada é proveniente da presença de duplas ligações presentes na sua cadeia molecular. A insaturação do poliéster é fornecida, geralmente, pelo ácido ou anidrido maleico, assim como pelo seu isômero e ácido fumárico. No ácido isoftálico, os grupos ácidos são separados por um carbono do anel de benzeno que aumenta a oportunidade de produzir polímeros com maior linearidade e peso molecular mais elevado na reação da esterificação (fig. 2.6) (Hull e Clyne, 1996).

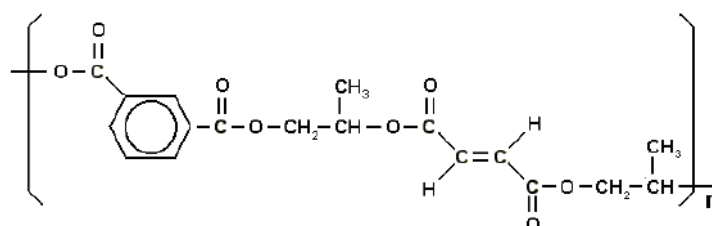


Figura 2.6. Cadeia Poliéster Isoftálica.

O ácido isoftálico não sofre a desvantagem da regeneração, podendo ser obtidos poliésteres com cadeias mais longas. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, maior resistência química e térmica, absorvendo melhor os impactos. Para melhorar a resistência a hidrólise do poliéster substitui-se o glicol por Neopentil Glicol, pois em toda a fabricação de resina sempre sobra glicóis residuais. O NPG ( $C_5H_{12}O_2$ ) trata-se de um sólido cristalino branco com higroscopicidade que possui baixo teor de hidroxilas livres que favorecem a hidrólise do poliéster e sua degradação e "solubilização". Ele torna-se indicado para situações onde o polímero vai estar continuamente exposto a elevado teor de umidade (Hull e Clyne, 1996).

A resina poliéster insaturada isoftálica de aplicação náutica é totalmente polimerizável, de média reatividade e com baixa viscosidade quando não acelerada. Não há significativos trabalhos científicos anteriores que abordem suas propriedades, Aziz *et al.*

(2004) é um dos poucos estudos que relata, ao testar esta resina, que ela pode ter sua estrutura modificada para reagir melhor ao contato com grupos OH (hidroxila) e com a superfície das fibras naturais, tornando-a mais polar e hidrofílica. Entretanto, a maior parte das informações disponíveis ainda advém de dados de fabricantes.

Dados comerciais apontam que esta resina apresenta como principais características resistência à hidrólise e as intempéries, sobretudo quando acrescida do NPG, além de ótimas propriedades físicas e químicas em meios ácidos e alcalinos, notadamente, quando na presença do acelerador Naftenato ou Octoato de Cobalto e do Peróxido de Metil Etil Cetona que age como catalizador da resina (Peters, 1998).

Suas principais aplicações comerciais são a confecção de tanques, tubulações e acessórios reforçados com fibras de vidro, os quais necessitam ser submetidos a ambientes quimicamente agressivos, moldados em processo aberto (laminação manual ou a pistola) ou por enrolamento filamentar. Um dos seus usos mais comuns é como camada de revestimento *Gel Coats* e barreira química para piscinas e banheiras. Na tabela 2.1 apresentam-se as aplicações mais comuns para esta resina (Guia Reichhold, 2012).

Tabela 2.1. Aplicações comuns para a resina náutica com NPG (Adaptado do Guia Reichhold, 2012).

SETORES	APLICAÇÕES	UTILIZAÇÃO
<b>Ambientes Agressivos</b>	Tubos e tanques	Recomendada
	Fabricação de <i>Gel Coats</i>	Recomendada
	Estação de Tratamento de Efluentes	Muito Utilizada
	Piscinas	Bastante Utilizada
<b>Recreação &amp; Lazer</b>	Aplicações Náuticas	Bastante Utilizada
	Brinquedos para Playgrounds	Bastante Utilizada
<b>Transporte</b>	Peças automotivas	Bastante Utilizada
<b>Construção Civil</b>	Banheiras	Bastante Utilizada
	Telhas	Uso Eventual
	Assentos Sanitários	Uso Eventual
	Eletroeletrônicos	Pouco Utilizada



## 2.5. Fibras Vegetais

A redução na oferta de recursos fósseis à indústria de transformação percebida ao final do século XX elevou o valor da matéria-prima para produção de polímeros e fibras sintéticas. Isto somado à necessidade na redução de emissão de resíduos tóxicos na natureza impulsionou a utilização de fibras vegetais ou linocelulósicas, como reforço de matrizes poliméricas para produção de biocompósitos. Esta nova geração de materiais consegue interconectar princípios de sustentabilidade, com fatores ambientais de eco-eficiência, eco-inovação e *ecodesign*, permitindo que a engenharia e a química “verde” consigam desenvolver melhores processos e novos produtos (Mohanty *et al.*, 2005).

As fibras sintéticas comumente utilizadas apresentam em geral propriedades mecânicas superiores às fibras de origem vegetal. Contudo, as fibras naturais são recursos de fontes renováveis encontrados em grande parte de países tropicais e fortemente agroindustriais, como Brasil, Indonésia, Bangladesh e Índia.

As fibras vegetais apresentam muita variação em suas características, por exemplo, diferenças de espessura e comprimento dos filamentos. O teor de umidade presente, a idade da planta, o tempo do corte, além do tipo de cultivo e da qualidade dos nutrientes influenciam no seu desempenho mecânico tanto quanto a forma com que foram manipuladas, tratadas e tecidas. Tais fatores dificultam, mas não impedem sua aplicação industrial. Nos últimos anos tem sido observado um considerável crescimento do uso de reforços naturais, por meio de biocompósitos em indústrias de construção civil, militar, aeronáutica, naval e automobilística. Na fig. 2.7 mostra-se a classificação mais comum das fibras vegetais segundo a parte da planta de onde elas são retiradas.

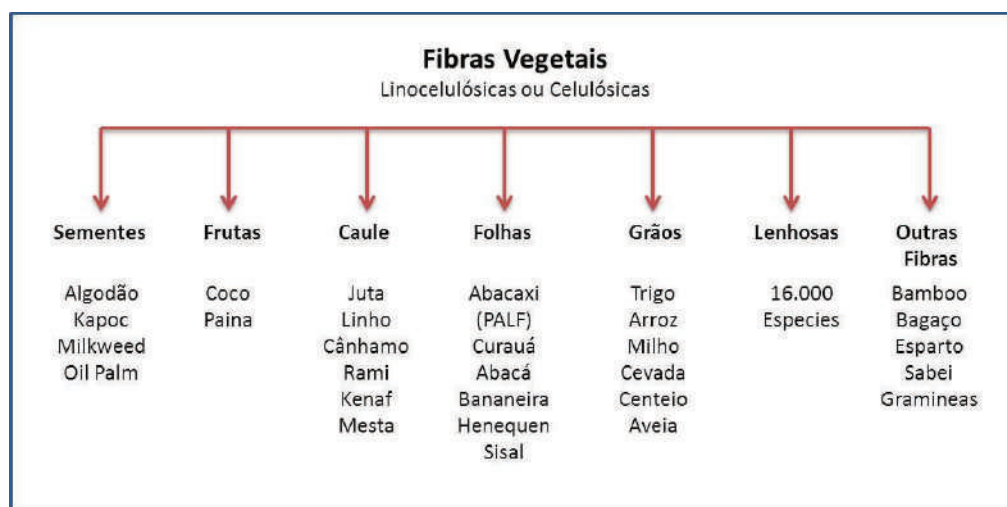


Figura 2.7. Classificação das Fibras Naturais Vegetais (Adaptado de Mohanty *et al.*, 2005).

### 2.5.1. Fibras Provenientes de Sementes

O primeiro grupo de fibras é proveniente das sementes, onde o desenvolvimento científico e industrial da fibra de algodão, notadamente no setor têxtil, abriu espaço para a investigação de outras fibras semelhantes.

Na última década, dezenas de estudos despertaram o interesse técnico e econômico quanto a utilização das fibras de *Oil Palm* para produção de biocompósitos termoplásticos com maior teor de reforço, para aplicação em peças de revestimento interno de veículos, coberturas de alto falantes, forrações de móveis, embalagens, entre outros. Apesar de necessitarem da aplicação de adesivos para melhorar a região interfacial, tem reduzido drasticamente o custo de seus compósitos (Rozman *et al.*, 2005).

### 2.5.2. Fibras de Frutas

As fibras de frutas ainda são muito pouco estudadas e utilizadas industrialmente, a exceção é a fibra de coco, que já há algum tempo vem sendo investigadas suas propriedades mecânicas quando combinadas a matrizes poliméricas. A composição de celulose, hemicelulose, lignina e extratos nas fibras de coco são semelhante às encontradas nas fibras de *Oil Palm*, o que permite serem comparadas e em muitos casos apresentarem desempenho similar (Rozman *et al.*, 2005). Outra fibra muito presente na flora brasileira é da banana, como visualizada na forma de folhas (fig. 2.8).



Figura 2.8. Folhas de fibra da banana (Artes de Minas *apud* Alibaba.com, 2012).

As fibras da banana fabricadas em empresa de Minas Gerais também oferecem boa opção para reforço. Em 1997 elas foram investigadas por Pothan *et al* (2007) que

observaram que na presença de uma matriz poliéster, estas necessitam passar por um tratamento superficial com silano para alcançar melhores resultados na tração e flexão.

### 2.5.3. Fibras de Folhas

As fibras vegetais provenientes das folhas apresentam as mais altas resistências específicas e úteis defesas contra agentes bacterianos. As fibras de sisal e de abacaxi (PALF- *Pineapple Leaf Fiber*) têm oferecido bons resultados como reforços em compósitos biodegradáveis.

Na última década diversos estudos observaram o desempenho de biocompósitos biodegradáveis feitos a partir de uma matriz de amido produzida pela Bayer (BAK 1095) reforçada por fibras curtas (distribuição aleatória) de abacaxi em comparação a mesma matriz com fibras de juta. As pesquisas demonstraram a necessidade do uso de tratamentos superficiais nas fibras para melhorar a adesão na região interfacial e encontrou um ponto consideravelmente ótimo, para atingir as melhores propriedades mecânicas, no percentual de fibras no compósito (Luo e Netravali, 1999) (Mohanty *et al.*, 2000) (Mishra. S. *et al.*, 2002).

Outras fibras que recentemente vêm chamando atenção de pesquisadores no Brasil e no exterior são as de curauá (Aquino *et al.*, 2008), planta nativa da região amazônica brasileira (fig.2.9 a) e as fibras de licuri (Leão *et al.*, 2011) planta abundante no estado da Bahia (fig.2.9 b). Outras fibras derivadas da folha que se destacam são as de henequen, planta da família do cânhamo, que tem sido bastante estudado, notadamente na Itália, quanto a sua capacidade de produção de biocompósitos em nível industrial (Toscanapa, 2010).

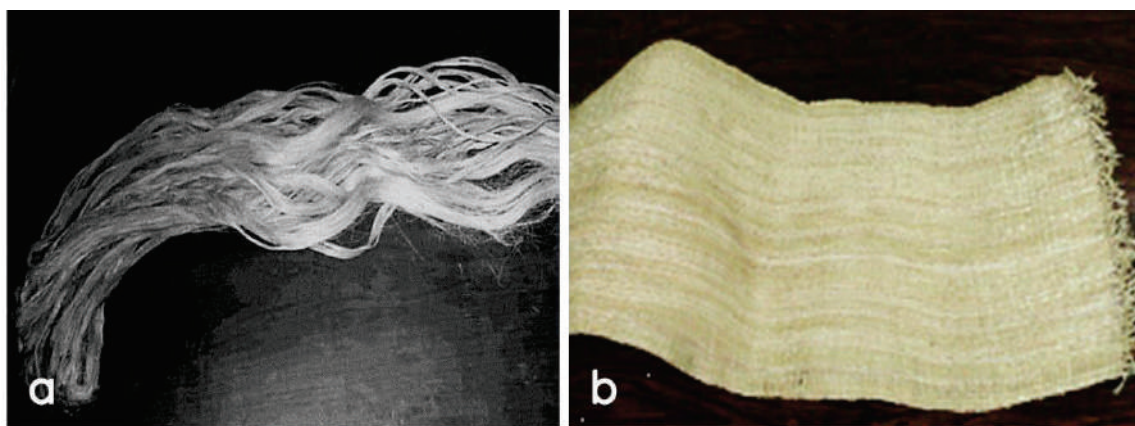


Figura 2.9. a) Fibras de curauá. (Aquino *et. al.*, 2008); b) Tecido de fibras de licuri. (Leão, 2008).

#### 2.5.4. Fibras de Grãos/Palha

Fibras de grãos de algumas plantas como arroz e trigo têm sido utilizadas em novos compósitos como substitutas das fibras lenhosas, devido a apresentarem características semelhantes às de madeira. A composição destas fibras apresenta maior percentual de hemicelulose e lignina e menor de celulose, quando comparadas as de madeira, no entanto, como esta composição tende a variar bastante, elas podem ser utilizadas sem produzir perdas consideráveis de propriedades (Mo *et al.*, 2005).

White e Ansell (1983), Hornsby (1997) e Avella *et al.* (2000) relataram avanços na pesquisa com biocompósitos reforçados por fibras de trigo, registrando elevados módulos de Young e de flexão além de resistência à tração comparada ao do polipropileno (PP), principalmente quando usando matriz poliéster. Em amostras de biocompósitos de matriz poliéster reforçadas com fibras de palha, Nam e Netravali (2006) observaram que as propriedades físico-mecânicas melhoram linearmente até o carregamento de 40% do peso e 61% no volume, a partir daí ocorreu linearmente o efeito inverso.

#### 2.5.5. Outras Fibras

O último grupo pertence às fibras não classificadas, razão do avanço nas experiências que observam também o potencial de novas partes vegetais, como fonte fornecedora de novas fibras. Dentre estas o bambu merece destaque. Segundo Kitagawa *et al.* (2005) os biocompósitos reforçados por fibras de bambu (fig. 2.10 a e b) ainda oferecem mais desafios que oportunidades.

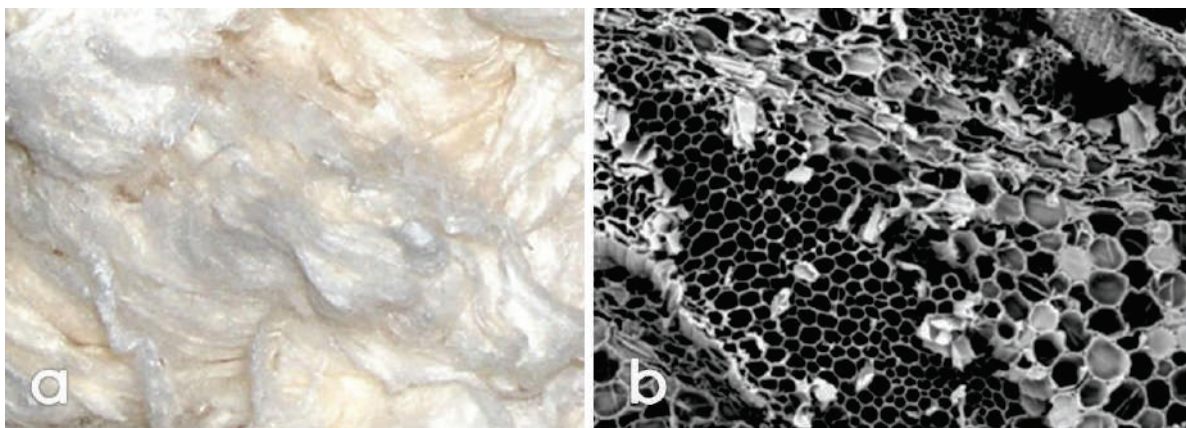


Figura 2.10. (a) fibras de bambu (Bambrotex, 2012); (b) MEV de superfície transversal de espécie de bambu (Marinelli *et al.*, 2008).



Eles alcançam melhor módulo elástico à tração quanto maior for o percentual de fibras, no entanto, a resistência decai nesta mesma proporção. As fibras não classificadas como as gramíneas, esparto e bagaços apresentam em compósitos, muitas falhas estruturais, devido a uma pobre região da interface o que resulta em baixas propriedades mecânicas.

### 2.5.6. Fibras Duras ou Provenientes do Caule

Estas fibras são encontradas em grande quantidade em todas as regiões do planeta, representando potencialmente uma grande fonte de recursos renováveis e de reduzida emissão de carbono, no entanto, apesar de estudadas há pelo menos um século, apenas uma pequena parte destas plantas é absorvida para a produção de reforços para biocompósitos. Normalmente, as divisões celulares são mais grossas durante o período de florescência. Depois deste estágio uma colheita produtiva da fibra pode ser começada. (Munder *et al.*, 2005).

Muitas destas culturas perderam espaço industrial no Brasil em meados do século XX, devido ao crescimento das fibras têxteis sintéticas, causando uma redução do plantio e consequentemente, diminuição da oferta destas fibras no mercado interno. O linho e o rami foram as mais afetadas por esta crise, a juta tem sido cultivada de modo artesanal em alguns estados da região norte. Em muitos casos há a necessidade de serem exportadas de países asiáticos ou africanos para serem estudadas (Mattoso *et al.*, 1996).

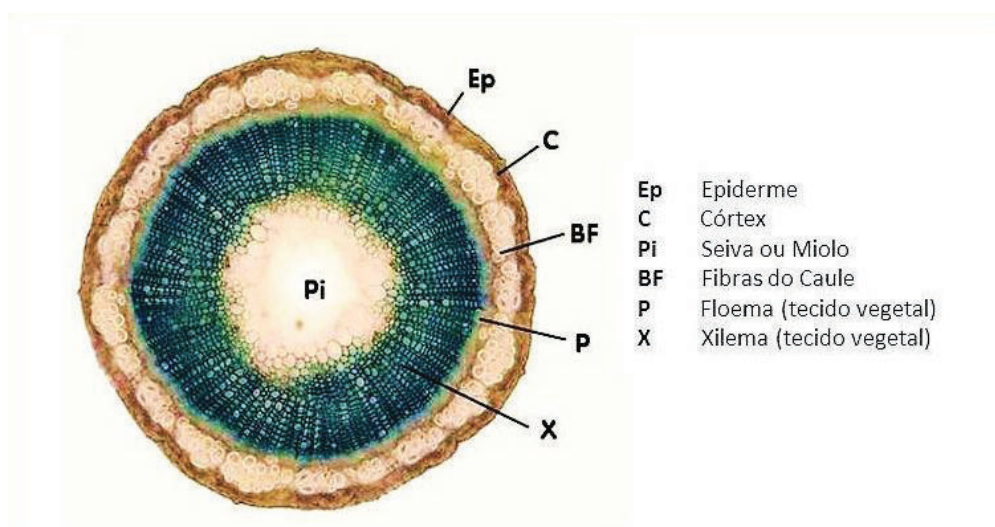


Figura 2.11. Secção transversal da estrutura interna de uma fibra de caule (Adaptado de Raven *et al.*, 2007).

No Brasil a logística dificulta a produção de fibras com a qualidade requerida para a produção de biocompósitos, os primeiros tratamentos na fibra devem ocorrer logo após a colheita, como os agricultores nacionais mantêm suas culturas muito distantes das fabricas que a comprem, e tem a instrução ou os recursos para iniciar estes procedimentos, a maior parte das nossas fibras chega à indústria com cortes irregulares, cheias de impurezas, com teor de umidade excessiva ou danificadas. Na figura 2.11 ilustra-se a estrutura característica das fibras oriundas do caule das plantas.

As fibras do caule chegam à indústria com diversas impurezas e por serem mais espessas que as demais, passam por diversos tratamentos necessários para dotá-las de melhor uniformidade em seu desempenho mecânico, tratamentos conhecidos por descascamento, que são responsáveis pela separação da fibra dos filamentos de madeira, para serem posteriormente batidos, limpos, ordenados e selecionados os fios tanto para seu uso como reforços soltos na matriz quanto para sua posterior fiação (Munder *et al.*, 2005).

Em alguns países europeus estas espécies ganharam elevada importância devido à descoberta de suas propriedades mecânicas, superiores a maior parte das fibras vegetais conhecidas além de oferecerem um menor custo se comparadas às fibras manufaturadas, principalmente como substitutas à fibra de vidro. Na Alemanha, são muito requisitas como reforço de compósitos na construção civil e principalmente na indústria automobilística. Entre 1996 e 2003 o uso de fibras naturais, excluídas as de algodão e madeira, na produção de veículos alemães elevou de 4000 toneladas para 18000 toneladas (Karus e Kaup, 2002).

A reunião da Comissão Europeia de 2000 determinou que as indústrias de veículos do bloco econômico devem aumentar em 95% o uso de materiais recicláveis até o ano de 2015 (European Guideline/53/EG, 2000). Em 2005 Chen *et al.* relataram avanços no uso de fibras de rami combinadas com *kenaf*, usadas como reforço para compósitos destinados a produção de peças para painel de automóveis.

#### **2.5.6.1. Fibras de Juta**

A Juta (*Corchorus capsularis*) é considerada uma das mais importantes fibras desde a descoberta do algodão, mas é igualmente relevante como matéria-prima para produtos não têxteis (Mohanty e Misha, 1995). Trata-se de uma fibra têxtil vegetal que provém da família Tilioidae.

Para alguns autores sua origem reside na região mediterrânea (Bismarck, Mishra e Lampke, 2005), entretanto muitos estudiosos apresentam divergentes opiniões sobre isto. Lundgren e O'Connell (1948) acreditam que dois dos mais comuns tipos de juta: A branca teria surgido na península hindu e a juta *tossa* apareceu inicialmente na África. Já Anon (1942) *apud* Lundgren e O'Connell (1948) afirmaram que as províncias ao sul da China seria a mais provável região de surgimento das duas tipologias. A parte desta polêmica, esta erva lenhosa proliferou em países de clima predominantemente úmido e tropical, como Índia, Bangladesh, China, Mianmar, Nepal e Tailândia, que respondiam até 2003 por 95% da produção mundial (Kozłowski, Baraniecki e Barriga-Bedoya, 2005).

A planta alcança uma altura de 3 a 4 metros e o seu talo mede aproximadamente 20 mm de espessura. A época de semear varia, segundo a natureza e o clima. As plantas florescem entre 4 a 5 meses depois de semeadas quando inicia sua colheita. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo da maceração. As árvores cortadas rente ao solo por meio de foices são limpas das folhas, postas em feixes dentro da água corrente ou parada. A alta temperatura das regiões nas quais é cultivada favorece a secagem ao ar livre e a consequente fermentação e desta forma consegue-se prepara-las até dez dias, permitindo a retirada da casca da planta e separação da fibra da parte lenhosa do talo. É uma cultura fácil, acompanhada de uma maceração trabalhosa e de pouco rendimento, sem a utilização de agrotóxicos ou fertilizantes. (Kozłowski, Baraniecki e Bedoya, 2005).



Figura 2.12. a) Secagem e b) fabricação industrial da fibra de juta (Pautas na Web, 2012).

Até 1930 o Brasil dependia exclusivamente da Juta importada da Índia. Introduzida no Brasil por Ryota Oyama, a cultura foi iniciada por japoneses, que desenvolveram a variedade designada – Oyama, difundida e plantada na região amazônica, chegando a representar 30% da economia do estado do Pará (Sociedade Brasileira de Cultura Japonesa,

1992). Na figura 2.12 (a e b) é possível observar o processo de secagem e produção da fibra utilizado no Brasil.

Atualmente o estado do Amazonas é responsável pela produção anual de 12 mil toneladas de filamentos de malva e juta (fig. 2.13). A Brasjuta, cooperativa responsável pela maior parte da produção da região, pretende criar um grupo de estudo para avaliar a produção na região do médio Solimões, com o objetivo de manter o debate permanente em torno desse mercado na busca de atingir consumidores internos e externos (AGECOM, 2012).



Figura 2.13. Produção de fibra de juta no Brasil (Ning, 2012).

#### 2.5.6.2. Propriedades Mecânicas das Fibras de Juta

A celulose é a base estrutural da fibra de juta e está diretamente associada com outras substâncias polares como lignina e a hemicelulose (Dence e Reeve, 1996), como são possíveis de serem observados através da composição média da fibra descrita na tabela 2.2.

Dentre os demais componentes, a hemicelulose atua como um elemento de ligação entre a celulose e a lignina, não estando diretamente correlacionada à resistência e dureza das fibras. De estrutura amorfa, a lignina é um polímero com constituintes aromáticos e alifáticos, que une a fibra de juta, formando a parede celular. Fornece resistência na compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular. Em alta concentração influencia na estrutura assim como nas propriedades, na morfologia e na flexibilidade. A pectina é um polissacarídeo presente nas paredes celulares e com função aglutinante. A composição dos teores dos constituintes das fibras naturais influencia nas suas propriedades (Azuma *et al.*, 1985), como se ilustra na tabela 2.3.



Tabela 2.2. Composição média da fibra de juta  
(Mohanty e Misra, 1995); (Banco de dados da BPMCC – DEM/UFRN, 2008)

FIBRA DE JUTA	
Celulose (%)	64,1
Hemicelulose (%)	13,6-20
Lignina (%)	12-13
Água (%)	9,7
Extrato Aquoso (%)	1,1
Cinza (%)	0,7
Ceras (%)	0,5
Gorduras Cerosas (%)	0,3
Pectina (%)	0,2

Tabela 2.3. Propriedades mecânicas da fibra de juta  
(Banco de dados da BPMCC – DEM/UFRN, 2008) (Callister Jr., 2008).

FIBRA DE JUTA	
Resistência à Tração (MPa)	287-597
Módulo de elasticidade (GPa)	26,5
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,3
Módulo Específico (GPa/(g/cm <sup>3</sup> ))	38
Alongamento (%)	1,5-1,8
Diâmetro da fibra (µm)	300

Dada à proporção centesimal das substâncias orgânicas da juta tem-se: Carbono (46,30%), Oxigênio (47,60%) e Hidrogênio (6,10%). Seu principal componente é a celulose, sob a forma de linho-celulose. A juta tem boa afinidade para corantes diretos e para corantes básicos.

O comprimento médio de suas células elementares é de 0,80 mm, e o diâmetro varia de 0,01 a 0,03 milímetros. É uma fibra muito higroscópica, capaz de reter a umidade em até 12%, o que a torna a matéria prima ideal para a sacaria, pois é capaz de evitar tanto o ressecamento quanto a fermentação do alimento acondicionado (Mohanty e Misra, 1995).

Em 1999 Mohanty, Khan e Hinrichsen apresentaram um extenso estudo sobre o uso do tecido de juta como reforço para compósitos. Diversos tratamentos superficiais, como a

retirada da cera, tratamento alcalino (maceração), assim como o tratamento com metil metacrilato e acrilonitrila (monômero da poliacrilonitrila) foram experimentados e comparados sua influência em relação ao percentual de reforço nos biocompósitos com matriz biodegradável BAK 1095 criada pela multinacional Bayer.

Devido à presença de grupos hidroxila e outros polares em vários componentes da juta, a absorção da umidade é elevada que conduz à ligação interfacial fraca entre fibras e as matrizes mais hidrofóbicas. Para o grupo de Mohanty (2000), para se desenvolver materiais compósitos reforçados com fibras de juta com melhores propriedades mecânicas, é necessário o uso de tratamentos químicos apropriados.

Na sequência do estudo da juta com o poliéster amida desenvolvida pela Bayer (BAK 1095), Dash *et al.* (2002) alcançou melhores resultados substituindo a distribuição aleatória da fibra pelo tecido bidirecional num processo de laminação sanduíche por compressão. Mohanty *et al.* (1999) conseguiu elevar de 30% para 60% o ponto ideal de reforço nos biocompósitos gerados, indicando que não só o tratamento superficial observados, mas notadamente, a disposição geométrica da fibra e o modo de fabricação do material são capazes de melhorar o desempenho geral, sem onerar a sua confecção.

### 2.5.7. Fibras Lenhosas

As fibras lenhosas são classificadas em fibras provenientes de madeiras duras ou flexíveis e extraídas de madeiras recicláveis. A produção de biocompósitos termoplásticos com fibras de madeira quadruplicou entre 1997 e 2000. Resinas de polietileno (PE), polipropileno (PP) e cloreto de polivinila (PVC) foram as matrizes mais largamente utilizadas (Mohanty *et al.*, 2005).

As fibras de madeira foram as primeiras fibras celulósicas utilizadas como reforço, em substituição as sintéticas, permitindo que a indústria reduzisse o custo e aumentasse a produção de compósitos. Todavia, a redução da oferta de madeiras em meados do século XX, devido à exploração não sustentável das reservas florestais e ao desmatamento ilegal, aumentou o preço desta matéria-prima ao passo que forçou a comunidade científica a buscar soluções alternativas. A escassez da madeira virgem impulsionou as pesquisas e o investimento no aprimoramento das demais fibras vegetais.

Mais recentemente as fibras de madeira voltaram a ser tratadas com atenção, desta vez para solucionar outro problema causado por sua exploração. A grande quantidade de

resíduo resultante da atividade em serrarias, madeireiras e indústrias de mobiliário que necessitam ter um destino que não o simples despejo no lixo (Silva L., 2008). A farinha mista de madeiras proveniente de sobras de serviço passou a ser pesquisada como um substituto natural à fibra de madeira verde, inicialmente nos Estados Unidos, onde praticamente desapareceu do mercado a fibra de madeira verde nativa (Shah *et al.*, 2008).

As pesquisas mais recentes demonstram que as fibras mistas de sobras de madeira - *wood flour*, também conhecidos por resíduos de madeira, funcionam bem economicamente, já que custam menos que qualquer outro tipo de fibra existente. Entretanto se comparado seu desempenho em biocompósitos com outras fibras vegetais, as fibras lenhosas apresentam propriedades mecânicas inferiores, é o que afirmaram Nam e Netravali em 2006 num experimento para o desenvolvimento de compósitos biodegradável a partir de uma resina de proteína concentrada de soja reforçada com fibras de rami. Quando foram comparados a outros biocompósitos com mesma resina, só que reforçados com fibras lenhosas de cerejeira, imbuia e tília americana, alcançou níveis superiores em termos de resistência última e de módulo de elasticidade à tração e à flexão.

#### **2.5.7.1. Fibras de Madeiras**

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia o Brasil dispõe de quase um terço das florestas tropicais existentes e lidera a produção mundial de madeira, da qual, consome mais de 93%, o que o torna líder também em consumo. Com uma área de floresta amazônica de aproximadamente 3,6 milhões de quilômetros quadrados em seu território (Azevedo *et al.*, 2008).

A exportação de madeiras brasileiras vem caindo desde 2007. As espécies mais procuradas são: cerejeira, cedro, angelim-pedra, curupixá, cumaru, goiabão, ipê, jatobá, louro-vermelho, marupá, massaranduba, muiacatira, pau-amarelo, pau-marfim, pequiá, pinus e sucupira, contudo a taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal no período de 2005 a 2008 foi uma das maiores da história, de anuais 23 mil km<sup>2</sup> (Marinelli *et al.*, 2008).

Desde 1980 diversos pesquisadores brasileiros apresentaram estudos de como fazer o país desenvolver economicamente sua indústria madeireira, gerenciando seus recursos com princípios de sustentabilidade e combatendo a biopirataria e o desmatamento indiscriminado e clandestino (Mercado, 1980) (Queiroz, 1983) (Santos e Hummel, 1988); (Mercado e Campaganini, 1988) (Angelo e Silva, 1997) (Vicent, 1992) (Angelo, 1998) (Angelo, Brasil e Santos, 2001).

Baseado em mais de vinte anos de experiências na área, o pesquisador do INPA, Dr. Antônio Donato Nobre implantou em 2008 o Projeto Fênix Amazônico, uma proposta para a construção de um ecossistema de empreendimentos sustentáveis na Amazônia. Segundo o projeto, a floresta conecta-se com as áreas desmatadas por meio de serviços ambientais e pelas sementes de espécies madeireiras, fibrosas e oleaginosas que vão reconstruindo o ecossistema degradado, e recriando seus serviços ambientais (Ning, 2012).

O projeto engloba na proposta de sua cadeia produtiva, os materiais compósitos, baseados na silvicultura de ciclo curto das espécies nativas, tais como a embaúba (*Cecropia*), marupá (*Jacaranda copaia*), caroba (*Jacaranda micrantha*), lacre, entre muitas outras, chamadas de espécies colonizadoras. Este planejamento imita o processo natural de recuperação da floresta que ocorre quando perturbações naturais surgem, aliando-se à tecnologia de fabricação de compósitos de madeira, que constitui hoje um dos mais importantes campos de pesquisa e desenvolvimento na área de materiais poliméricos (Carashi e Leão, 2001).

O uso de compósitos com fibra de madeira reciclada em matrizes termoplásticas e termofixas também cresce fora do Brasil. No Japão e em grande parte da Europa, países onde há escassez de reservas naturais, a farinha proveniente de sobras de material constitui uma solução sustentável, de baixo custo e, sobretudo limpa. Nos Estados Unidos, há cem anos empresas como a *Pioneer Sawdust* fornecem madeira reciclada e processada (fig. 2.14) para aplicações ao ar livre como em decks, trilhos, escadas e em revestimentos e móveis de edifícios (Seldén *et al.*, 2004).



Figura 2.14. Farinha de pinho com granulometrias variadas (Pioneer Sawdust, 2012).

Os resíduos de madeira são considerados como fibras de biomassa alternativas de baixo custo. Segundo Stokke (2005) há cinco diferentes fontes provedoras de fibras lenhosas recicladas: resíduos florestais; resíduos de moinhos ou engenhos; resíduos da agricultura combinados com outras culturas como milho e trigo; resíduos e partículas destinados à produção de energia e, os resíduos urbanos, advindos de construções, demolições, restos de embalagens e mobília, para citar os mais relevantes.

#### **2.5.7.2. Núcleo com Fibras de Madeiras**

Diferentes materiais são usados como núcleos de compósitos sanduíches. A madeira foi o primeiro destes, que segue sendo usada em muitas aplicações comuns como portas, divisórias e diversos materiais para construção civil. Igualmente na maioria de esquis da neve, embora alguns utilizem a estrutura em favo de mel, devido a seu alto desempenho, assim como espumas e núcleos plásticos reforçados (Peters, 1998).

A vantagem primordial do baixo custo da madeira vem se deteriorando rapidamente com o tempo, devido à escassez das reservas e ao mau uso destas, que a encareceu demasiado, muitos usuários relatam a dificuldade em ter acesso ao material, recorrendo assim às fibras recicláveis ou a farinha de sobras de material.

A facilidade de utilização e a excelente durabilidade do produto acabado conduziram ao aumento do uso em particulares aplicações tais como cascos do barco, grandes tanques, paletas e recipientes transportados por via aérea. Este uso deve-se as excelentes propriedades compressivas e do módulo elástico quando comparado a outros materiais de recheio mais caros disponíveis como: espumas e favos de mel com fibras sintéticas de kevlar, fibra de vidro, alumínio ou carbono (Peters, 1998).

Nos últimos anos muitos estudos têm observado o desempenho deste material diante de intempéries naturais. O reforço de fibras de madeira enquanto resíduos pode ativar pontos na superfície, fortalecendo impurezas ou agentes de tratamento superficial que afetam o ritmo do mecanismo de degradação química (Seldén *et al.*, 2004).

Segundo Stark e Mutuana (2004) o efeito do envelhecimento nas propriedades de compósitos de fibra de madeira com polipropileno não tem sido extensivamente documentado. No entanto, compósitos contendo 20% e 40% de resíduos de madeira expostos ao ar úmido e a água por mais de 100 dias, apresentaram relativamente pequenos efeitos de umidade assim como das amostras expostas somente ao ar úmido.

Na presença do PVC (Cloreto de polivinila) o efeito da adição de fibra de madeira no nível de degradação foi descrito por Mutuana *et al.* (2001) e Stark e Mutuana (2004). Eles observaram que a presença destas fibras promoveu e/ou acelerou a fotodegradação da matriz polimérica. As amostras exibiram maior descoloração do que as amostras de controle, contendo somente a resina sem reforço (Seldén *et al.*, 2004).



Figura 2.15. Compósito híbrido desenvolvido por Silva *et al.* (2011).

Silva *et al.* (2011) desenvolveram chapas híbridas de resina de poliuretana a base de óleo de mamona reforçado com camadas de fibra de vidro e resíduos de madeira e de endocarpo do coco na forma de núcleo (fig. 2.15). Para obtenção das fibras linocelulósicas, os resíduos foram processados e peneirados em moinho excêntrico com classificação granulométrica entre os mesh 2 e 27, para posteriormente serem misturados a resina com reforço de adesivo a base de mamona para a formação do material para o núcleo. Devido à natureza do particulado utilizado, o processo adotado pelo pesquisador alterou o método normal (*hand lay up*) na obtenção da placa, contudo os resultados obtidos indicaram um bom desempenho da placa tanto no estado úmido quanto no seco.

## 2.6. Envelhecimento Ambiental Acelerado

A primeira técnica para o envelhecimento artificial ambiental, em modo acelerado, aplicável a biocompósitos, denominados de testes de *Arrhenius*, foi descrita em 1899 por W. Herzberg que aplicou artificialmente calor seco a folhas de papel para medir a degradação do material e verificar a idade de documentos antigos e de registros históricos. O papel assim como outros compósitos orgânicos, armazenados em condições normais,

está sujeito, ao longo dos anos, a um inevitável número de processos de deterioração (Porck, 2000).

Até 1920, pesquisadores norte-americanos e suecos substituíram o calor utilizado por Herzberg por níveis mais elevados de temperatura e acrescentou luz solar como um segundo fator climático. Em 1929 Rasch determinou que papéis expostos por 72 horas a uma temperatura de 100°C apresentavam a degradação correspondente a um envelhecimento natural entre 18 e 25 anos (Rasch e Stone 1932) (Wilson e Parks 1980 *apud* Porck, 2000). Na década de 1950, os pesquisadores Baer e Lindström começaram a questionar a validade dos testes de envelhecimento acelerado que adotavam calor seco e temperatura única, defendendo a utilização de um terceiro fator climático, a umidade relativa, como forma de aperfeiçoar os testes de envelhecimento acelerado (Zou *et al.*, 1996).

A evolução nas tentativas de melhor compreender a degradação em relação à vida útil de biocompósitos passou por avanços e retrocessos entre as décadas de 1960 e 1970 (Porck, 2000). Kamal e Saxon apresentaram equações polinomiais empíricas que foram contestadas mais tarde por Nelson (1990 *apud* Robert *et al.*, 2009). Para determinar com precisão os mecanismos de degradação de um material precede ter por foco dois aspectos fundamentais: compreender a velocidade da degradação e construir um parâmetro que permita prever quantitativamente, em termos de tempo, uma referência comparativa confiável entre o nível de envelhecimento e a manutenção das propriedades do material (Crol, 1987 *apud* Robert *et al.*, 2009).

Quando se estuda a degradação dos materiais, percebe-se que a variabilidade de classes, as diferenças de estabilidade e de vida útil dos materiais, torna impraticável sugerir ou determinar um método uniforme para realização de testes de envelhecimento acelerado, capazes de ser aplicável para avaliar a vida útil de qualquer material. Convencionou-se para tanto uma escala de estabilidade dos materiais em três níveis ou classes, desenvolvida a partir de dois estudos publicados por Kühn (1968) originando alguns padrões para a realização de testes semelhantes. Entretanto para estimar a condição potencial de serviço em longo prazo nos três níveis apontados por Feller (1994), é necessário observar dois aspectos: primeiro a estabilidade da composição de materiais, ou seja, sua resistência às intempéries, em segundo lugar a durabilidade, mensurada geralmente por meio de ensaios mecânicos (Porck, 2000).



Em 1980 os pesquisadores Batterham, Hamilton e Weightman armazenaram caixas de papelão típicas da época com conjuntos de papel para o Arquivo Nacional da Austrália. 27 anos depois eles foram comparados com papeis envelhecidos aceleradamente através do teste de Herzberg, aperfeiçoado por Rasch e normatizado em 1985 pela TAPPI - *Standard Test Method T453 Effect of Dry Heat on Properties of Paper and Board*, através de atualização da norma divulgada em 1963. Na figura 2.16 (a, b e c) é possível observar os dois arquivos envelhecidos.

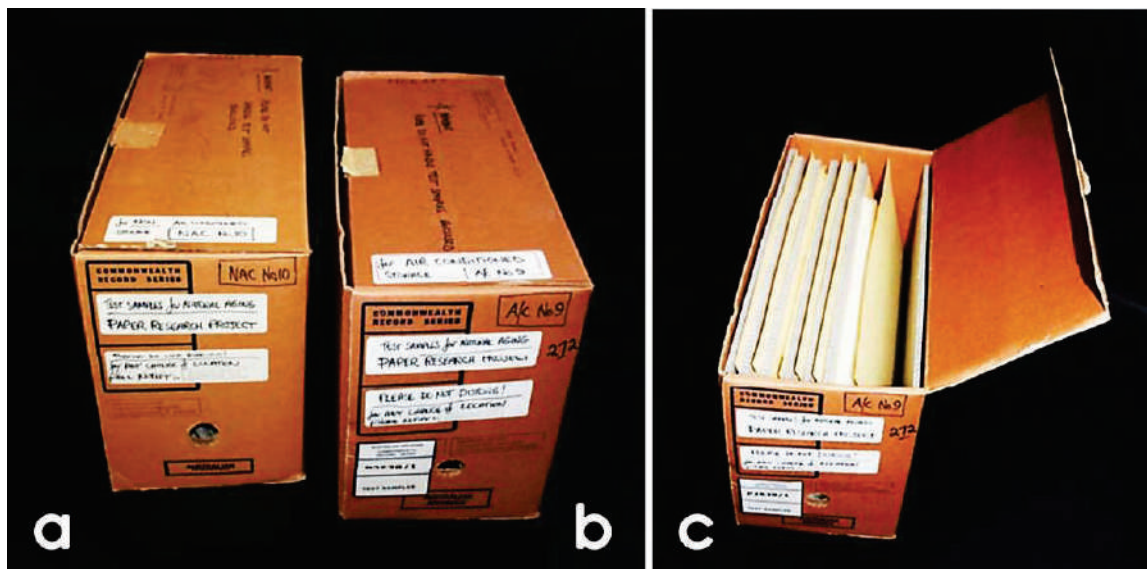


Figura 2.16. a) Arquivo envelhecido naturalmente; b) arquivo envelhecido aceleradamente fechado e c) arquivo envelhecido aceleradamente aberto (Batterhan e Rai, 2008).

Após o experimento os pesquisadores concluíram haver correlação, não progressiva, entre o tempo de exposição do material e a degradação ocorrida. Também foi observado que para se atingir o envelhecimento entre 18 e 25 anos, apontado por Rasch em 1929, faz-se necessário elevar a temperatura de exposição para 105°C. (Batterham e Rai, 2008).

A partir da década de 1980 diversas organizações iniciaram um processo de normatização e de atualização dos testes *Arrhenius*. Algumas normas alcançaram um padrão de abrangência apenas nacional, outras alcançaram reconhecimento e aplicação internacional, dentre estas, destacam-se:

- ASTM (Sociedade Americana para Testes e Materiais);
- TAPPI (Associação Técnica da Indústria de Papel e Celulose) e;
- ISO (Organização Internacional de Normas).



Apesar do notório e crescente interesse da comunidade científica em investigar por meio de testes de envelhecimento acelerados, agora normatizados, a degradação dos materiais existentes e novos, também iniciaram movimentos de contestação. Sereda e Litran em 1980 ponderaram sobre a avaliação de materiais quando testados em condições extremas nas câmaras de envelhecimento. Para estes pesquisadores as amostras ficam diante de uma condição climática que poderá não se repetir naturalmente e dependendo das condições reais de uso e de armazenamento, assim como do ambiente ao qual este material for exposto, a sua estabilidade e durabilidade poderão ser aumentadas ou reduzidas consideravelmente.

Em 1991, Brown (*apud* Mohanty *et al.*, 2005) observou em pesquisa que a maioria dos cientistas diretamente envolvidos em estudos de envelhecimento ambiental acelerado, acreditava não serem capazes de prever ou simular condições de serviço de um material ao longo do tempo. A maioria dos pesquisadores entrevistados considerou que as equações conhecidas não forneciam informações confiáveis, tampouco conseguiam avaliar com exatidão a interferências dos fatores climáticos na degradação de um material.

Os testes de envelhecimento natural e acelerado são ferramentas para se avaliar qualitativamente as condições de serviço dos materiais testados, mas quando combinados a equações e fatores de comparação, estes podem ser utilizados como auxílio na análise quantitativa, permitindo perscrutar o ciclo de vida do material testado (Mohanty *et al.*, 2005).

Uma das primeiras decisões que devem ser feitas no planejamento de testes de envelhecimento acelerado é definir quais propriedades serão medidas como indicação do grau de envelhecimento. O relatório de Edge *et al.* (1992) defenderam que o investigador não devesse concentrar-se apenas na mudança física, como perda da elasticidade, aderência ou resistência, incluindo testes químicos para melhor explicar os aspectos críticos determinantes das mudanças físicas (Mehta *et al.*, 2006).

Resinas naturais ou derivadas de petróleo, assim como as fibras usadas como reforço possuem estruturas atômicas e cristalinas complexas, configurando uma macroestrutura heterogênea, que dependendo da configuração a que forem submetidas na fabricação do compósito, tenderão a reagir de modo não uniforme, tanto química quanto fisicamente, frente às intempéries a que forem submetidas.

Feller (1994) aponta três propósitos principais para se estudar o envelhecimento ambiental acelerado, em ordem aproximada da facilidade com que podem ser alcançados: o primeiro é estabelecer, em tempo conveniente, uma classificação física relativa de materiais ou combinações de materiais, em relação à sua estabilidade química ou durabilidade física. O segundo propósito é estimar ou "prever" a manutenção em longo prazo do potencial dos sistemas de material em condições de utilização previstas. Por último, objetiva-se identificar como ocorrem os processos de degradação acelerados em laboratório, a fim de elucidar as reações químicas e seus efeitos no material. Este último propósito possibilita investigar o desenvolvimento de técnicas para acompanhar o grau de degradação, permitindo propor métodos para a prorrogação da vida útil do material.

A diversidade de métodos e equipamentos dificulta uma comparação rápida e concisa de resultados. Há relatos de testes com diferentes câmaras, que por vezes mesclam normas e variam nas determinações de níveis de radiação UV, umidade ou variação de temperatura, além de testes realizados no solo, os quais igualmente apresentam variações, quanto a níveis de pH, teor de minerais e agentes biológicos degradantes. Variantes justificadas em razão da literatura e das diferenças entre os biocompósitos testados e as necessidades pretendidas com suas futuras aplicações (Feller, 1994) (Alvarez *et al.*, 2006).

### 2.6.1 Envelhecimento por Imersão

Fibras naturais são altamente hidrofílicas além de conterem água em seu interior, notadamente esta característica se estende aos compósitos com elas reforçados (Islam *et al.*, 2005). Segundo Alan *et al.*, (2006) a degradação decorrente da saturação por umidade é determinante para a perda de propriedades mecânicas, afeta as propriedades físicas e elétricas, se presentes, interferindo na interface entre a fibra e a matriz, modificando a estabilidade dimensional do material por meio da expansão de sua espessura. Para tanto, a absorção de água em compósitos reforçados por fibras linocelulósicas é importante para se determinar as características influentes na medição da capacidade de utilização dos futuros materiais.

Em estudo sobre os efeitos da água do mar em compósitos laminados do tipo sanduíche com núcleo de espuma, Xiaoming e Weistman (2004) verificaram que o nível de absorção e degradação está relacionado ao espaço formado na interface entre a resina e o reforço, quanto maior a fração de fibras, menor a entrada da umidade na estrutura.

Islam *et al.* (2005) estudaram os defeitos causados pela umidade em compósitos de poliéster reforçado por fibras de juta por meio de radiografia. Foi observada que o biocompósito absorve, em média, oito vezes mais em comparação com compósitos a base de epóxi com fibras de vidro.

Le Duigou *et al.* (2009) compararam as propriedades mecânicas de um biocompósito biodegradável feito de ácido polilático (PLLA) reforçado por fibras de linho com o PLLA não reforçado após envelhecimento em água do mar, por meio de banhos de 60 litros com temperatura variando entre 4°C e 80°C pelo período de 90 dias, com o objetivo de obter-se um envelhecimento higro-termal. O experimento observou uma degradação maior que a observada em compósitos reforçados por fibra de vidro.

### **2.6.2. Envelhecimento Ambiental Acelerado de Biocompósitos**

Materiais biocompósitos, assim como qualquer outro material, necessitam atender estritamente em termos de sustentabilidade de suas funções, às condições gerais de serviço com mínimas mudanças de propriedades ao longo de seu ciclo de vida. A presença do envelhecimento ambiental nesses materiais pode acarretar a degradação de suas propriedades influenciando no seu desempenho ao longo de sua vida útil (Feller, 1994).

Na primeira década do século XXI registrou-se um maior número de experiências com biocompósitos, notadamente marcadas pelo desenvolvimento de novos compósitos combinando fibras vegetais ainda não testadas, assim como resinas de menor impacto ambiental ou consideradas biodegradáveis. Uma preocupação maior com a aplicação industrial destes novos materiais, em relação aos compósitos já conhecidos dotou estas pesquisas com um caráter mais comparativo, evidenciados nos estudos de Rongzhi Li (2000) e La Counta (2001).

Rongzhi Li (2000) avaliou a degradação ambiental de biocompósito produzidos a partir da resina poliéster de alta densidade reforçada por fibras de pinho, provenientes de sobras de uso industrial. O complexo processo de aceleração de fatores englobou luz solar, umidade, variações de temperatura, poluição e oxidação por fungos. No ano seguinte foi criado, construído e testado um simulador de envelhecimento de modo acelerado com múltiplos fatores climáticos para avaliar compósitos com borracha (fig.2.17).

Os ciclos de emissão de envelhecimento ocorrem em geral com troca de fatores a cada 6 horas. O resultado foi comparado com amostras de compósitos similares com

diferentes tempos de envelhecimento natural, para se estabelecer uma referência quantitativa entre eles. Segundo os autores o teste é capaz de envelhecer cada material 7,5 vezes o tempo de duração do envelhecimento acelerado (La Counta *et al.*, 2001).

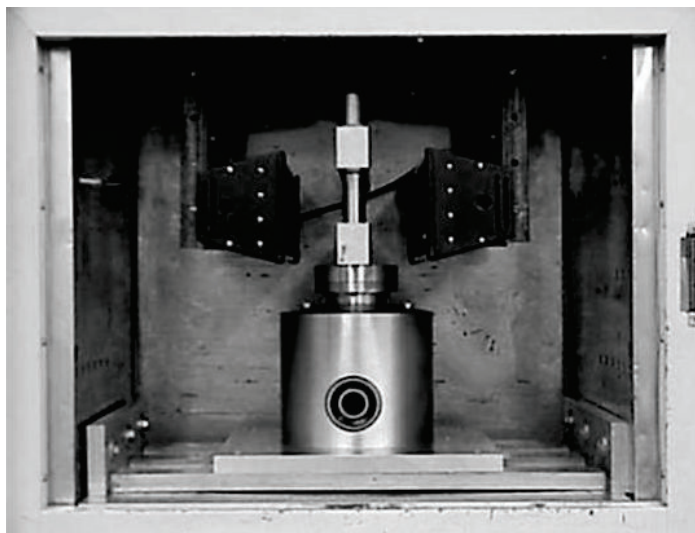


Figura 2.17. Equipamento de emissão de radiação UV adaptado no interior de uma estufa (La Counta *et al.*, 2001).

Feldman (2002) justifica os esforços de Rongzhi e La Counta, ao observar que a degradação nos polímeros, quando utilizado na matriz dos biocompósitos, ocorre devido a uma dependência de fatores ambientais que agem combinados. O intemperismo considerado como uma indesejável mudança produzida pela exposição externa do material é particularmente severa aos fatores de natureza orgânica, combinando efeitos oxidativos e de natureza hidrolíticos devido à umidade relativa do ambiente. Quando degradados, materiais poliméricos tendem a apresentar efeitos comuns como a descoloração, fragilização de sua estrutura, perda de brilho, fissuras, além da presença de riscos sob sua superfície.

A partir do ano 2000, no entanto, nem todos os estudos foram direcionados no sentido de avaliar a degradação ambiental por meio de multifatores. Alguns seguiram realimentando teses precursoras, outros experimentaram novos caminhos. Shin *et al.* (2012) seguiu a proposta de Kamal e Saxon (*apud* Feller, 1994) e propuseram um novo fator matemático de aceleração, permitindo especular quantitativamente em anos o envelhecimento atingido pelo compósito. A iniciativa, contudo, apresentara limites de predição restritos à avaliação de um específico tipo de composição de material, além dos severos fatores ambientais pré-selecionados e do reduzido número de propriedades observadas.

Seldén *et al.* (2004) investigou os efeitos da radiação ultravioleta como único fator ambiental do experimento de envelhecimento acelerado de dois tipos de amostras, uma confeccionada somente com resina de polipropileno e outra de um biocompósito com matriz de polipropileno reforçada por fibras de madeira. Foram confeccionadas placas com variação entre 25% a 50% de reforço, sendo exposta a radiação por oito semanas, como pode ser visualizado na figura 2.18 (a e b).

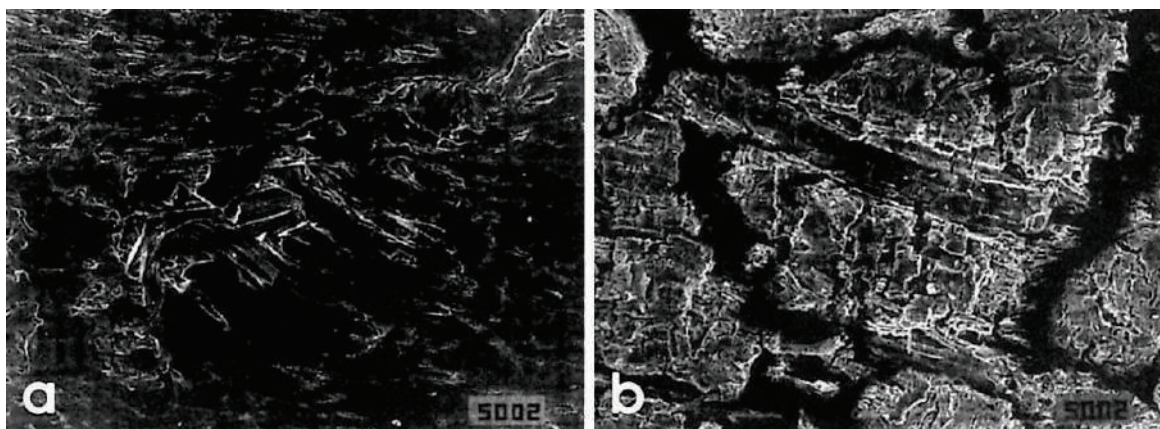


Figura 2.18. a) MEV do compósito não envelhecido; b) MEV do compósito após 8 semanas de exposição ao UV (Seldén *et al.* 2004).

Dois anos mais tarde, um projeto liderado por Alvarez ampliou o ambiente de aplicação das técnicas de envelhecimento acelerado, ao pesquisar a degradação de biocompósitos biodegradáveis por meio do enterro no solo de amostras feitas a partir de amido plasticizado reforçado por fibras curtas de sisal. No experimento observa-se tão somente a absorção de água assim como a perda de material da matriz, mas abriu espaço para novas pesquisas em diferentes ambientes, principalmente simulando condições de descarte de material e sua reação a outras intempéries. Um reflexo da preocupação crescente com o impacto ambiental ao nosso planeta (Alvarez *et al.*, 2006).

Apesar dos exemplos citados de pesquisas observando a degradação ambiental acelerada por um único fator, a grande maioria dos autores segue adotando testes multifatoriais. Mehta *et al.* (2006) testaram duas combinações de biocompósitos tendo por matriz única, uma resina poliéster insaturada. As primeiras amostras foram reforçadas por fibras de cânhamo, as demais por fibras de grama *Big Blue*. O teste de envelhecimento ambiental acelerado foi realizado numa câmara com três fatores climáticos simulados: radiação ultravioleta, condensação e spray de água.



Neelakanta *et al.* (2008) experimentaram a substituição da resina fenólica *novolac*, comumente utilizada em compósitos, por um biopolímero obtido a partir da liquefação de EFB (Empty Fiber Branch) em fenol gerando uma resina polimérica de natureza biodegradável para o desenvolvimento de um biocompósito reforçado por fibras de frutas secas de *Oil Palm*.

Outro exemplo da preocupação em desenvolver materiais biodegradáveis é o estudo coordenado por Khalil *et al.* (2010), que avaliou a biodegradação e propriedades mecânicas de amostras de compósitos de polipropileno reforçado com fibras do caule do *Oil Palm*. O envelhecimento acelerado foi realizado através do enterro das amostras no solo, verificando a perda de massa em intervalos de 3, 6 e 12 meses, com relação às amostras de controle.

## 2.7 Características da Fratura Mecânica

A necessidade de experimentar diferentes fontes naturais e sintéticas para o desenvolvimento de novos materiais é uma preocupação emergente da queda nas reservas de petróleo e seus derivados, da busca por substitutos mais leves e econômicos, assim como de ofertar ao mercado opções com características capazes de se adaptar as novas demandas da indústria. Torna-se assim importante compreender a mecânica das potenciais falhas de serviço, sobretudo a fratura ou dano, principais questionamentos para o caso dos compósitos e biocompósitos.

A fratura simples dar-se de uma separação de uma amostra de material (corpo de prova) em duas ou mais partes, em decorrência da imposição de uma tensão de natureza constante, em temperaturas mais baixas que a de fusão do conjunto de materiais e que se modifica lentamente na passagem de tempo (estática). Diversos ensaios mecânicos permitem ao investigador detectar parâmetros e limites para a avaliação das amostras, notadamente, dentro dos objetivos pré-determinados. Alguns destes ensaios requerem monitoramento contínuo como forma de identificar a formação e propagação do dano.

A formação e propagação do dano nos materiais compósitos dependem de diversos fatores:

a) das propriedades físicas, químicas e mecânicas das fases constituintes do sistema fibra/matriz;

b) das Características da interface fibra/matriz ou das camadas da impregnação do laminado, a influência das tensões ocorridas durante a cura e do sistema catalítico, dentre outros fatores decorrentes do processo de fabricação;

c) da orientação, distribuição e comprimento das fibras, se curtas ou contínuas, tal como a espessura e o número de camadas do laminado na configuração do compósito;

d) do tipo de carga aplicada, se estáticas de tração, flexão, compressão, ou se dinâmicas de impacto ou fadiga, sendo neste último caso, observando a velocidade, a frequência, amplitude da carga e razão de fadiga (R) do ensaio;

e) das condições ambientais ou de serviço, tais como o teor de umidade, que poderá alterar o módulo do material, da temperatura e de suas variações, assim como da corrosão e da incidência de raios UV que precocemente deterioram da resina;

f) da presença de descontinuidade geométrica no material como ranhuras, furos e entalhes.

De um modo geral o mecanismo do dano nos materiais compósitos, por exemplo, no caso de um carregamento simples de tração uniaxial, inicia-se por meio do surgimento de fissuras transversais (com relação à direção de aplicação da carga) na matriz, as quais podem se apresentar como um dano intenso ou de forma isolada e sempre dependendo do sistema fibra/matriz e sua configuração, ou seja, na forma de lâmina ou em compósitos laminados. Outras formas comuns de dano, também denominada de características da fratura, dos materiais compósitos são: fendas longitudinais, ruptura de fibras e delaminação, sendo esta última originada apenas nas configurações do tipo laminados. Detalhes de cada característica comum do dano são descritas na próxima seção para o caso específico dos compósitos a base resinas poliméricas.

### **2.7.1. Microfissuração na Matriz**

Este é o primeiro tipo de dano que se manifesta em cargas muito baixas na maioria dos casos da aplicação de cargas estáticas, assim como também nos casos da aplicação de cargas dinâmicas, como em testes de fadiga e impacto. Em geral a sua distribuição tem “espaçamento” uniforme ao longo de todo o comprimento da amostra (corpo de prova) podendo chegar ao denominado estado de saturação da fissuração na matriz (fig. 2.19). Para o caso de carregamento por fadiga, a fissuração pode iniciar no primeiro ciclo. A

identificação desse tipo de dano pode ser feita com base nas análises macroscópica e microscópica, dependendo do tipo de sistema fibra/matriz utilizado.

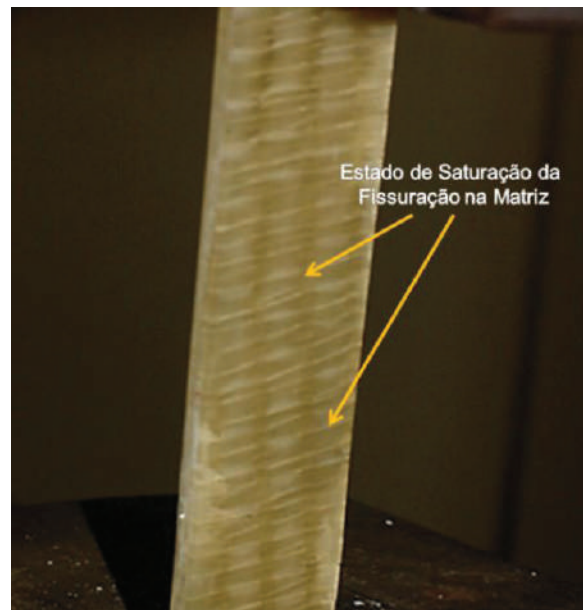


Figura 2.19. Microfissuração na matriz (Tinô, 2010).

Na análise microscópica da microfissuração da matriz outras formas de dano podem ser observadas gerando três tipos de fraturas diferentes (figura 2.20):

- a) coesiva na matriz - tipo de fissura que se propaga próximo à interface;
- b) coesiva na fibra – tipo de fissura caracterizada por exibir rupturas de fibras ao longo do seu eixo e não na secção transversal e;
- c) adesiva – esta fratura ocorre devido a uma desaderência na interface fibra/matriz.



Figura 2.20. Características da fratura em compósitos poliméricos. (Adaptado de Tinô, 2010).



Os defeitos de fabricação como a presença de bolhas ou de fibras danificadas antes da impregnação, nem sempre serão responsáveis pela origem das microfissuras na matriz. Já a desaderência fibra/matriz ocorrerá, praticamente, na presença de todos os tipos de cargas e de sistema interfaciais existentes. Convém notar que com o aumento da intensidade da carga aplicada a microfissuração inicial da matriz pode se transformar em fendas longitudinais e transversais.

### 2.7.2. Delaminação

Este é um tipo de dano característico dos laminados que ocorre devido à desaderência entre as camadas dos mesmos devido às tensões interlaminares que resultam num desequilíbrio das propriedades elásticas do material. A delaminação pode ser, em alguns casos, visualizada pelas análises macroscópicas, porém em geral sua melhor identificação dar-se-á por imagens de microscopia óptica (fig. 2.21), no entanto dificilmente pela microscopia eletrônica de varredura (MEV).

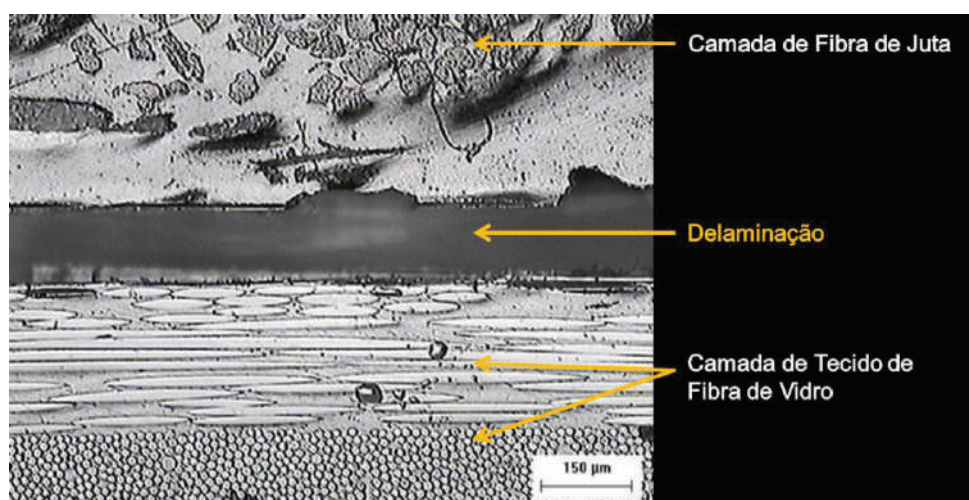


Figura 2.21. Delaminação entre as camadas de fibras em um compósito híbrido (Adaptado do Banco de dados da BPMCC – DEM/UFRN, 2008).

### 2.7.3. Ruptura de Fibras

As rupturas de fibras estão localizadas na região de fratura final, principalmente para o caso de aplicação de cargas estáticas, neste caso é sempre o último elemento constituinte a se romper um pouco antes da fratura final. No caso da aplicação de cargas dinâmicas, notadamente no caso da fadiga, a ruptura de fibras poderá surgir ainda nos primeiros ciclos de carga, dependendo da intensidade da amplitude de tensão. Nesse tipo de carregamento a ruptura precoce da fibra não implicará numa ruptura imediata do compósito. É uma característica do dano que pode ser visualizada na presença de

rasgamento, (figura 2.22 a). Geralmente a ruptura total das fibras caracteriza a fratura final do compósito e sua presença é mais forte nessa região, (figura 2.22 b). A ruptura de fibras muitas vezes vem precedida de uma fratura adesiva.

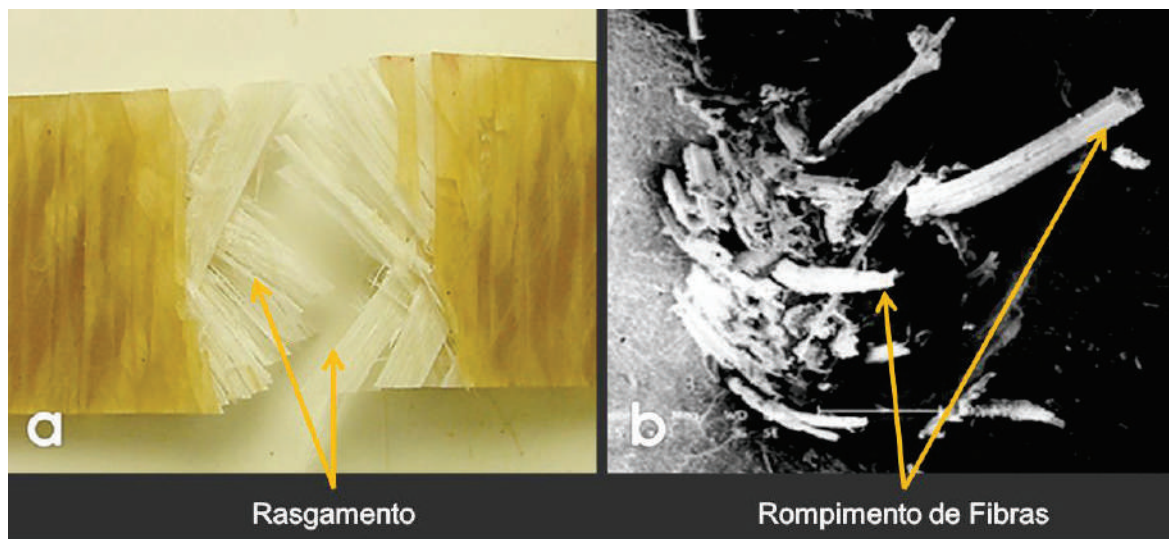


Figura 2.22. a) Presença de rasgamento na fratura (Tinô, 2010); (b) Análise microscópica (MEV) de uma ruptura da fibra de Juta (Aquino, 2009).

## CAPÍTULO III

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

---

Na primeira parte deste capítulo serão apresentadas as matérias primas utilizadas na fabricação dos biocompósitos e da placa polimérica de resina náutica. A descrição acompanha as características técnicas dos materiais, as recomendações de fabricantes, os equipamentos e procedimentos adotados para sua preparação, assim como as formas de acondicionamento.

Na segunda parte deste capítulo serão apresentados os procedimentos para a obtenção do Painel **BMJ**, do painel reciclado **BMJ-R**, para o laminado **BJ**, assim como para a resina a base do polímero **RN+NPG**. O método de trabalho adotado para o desenvolvimento destes experimentos detalha todos os passos para a fabricação das placas, assim como da elaboração de moldes auxiliares para a preparação das mesmas.

Na parte final do capítulo serão descritos os ensaios mecânicos realizados, seus parâmetros e normas adotadas para a confecção dos corpos de prova. Também serão apresentados, assim como detalhados o ensaio de envelhecimento ambiental acelerado, os recursos utilizados para sua realização, o monitoramento contínuo dos equipamentos durante o ensaio, além do controle dos fatores climáticos necessários para validar o experimento.

#### 3.1. Materiais

As matérias primas utilizadas para a produção dos biocompósitos poliméricos desenvolvidos estão descritas nesta seção.

##### 3.1.1. Resina Náutica

A resina náutica utilizada para o desenvolvimento dos biocompósitos foi a RESAPOL 10134 fornecida pela *Reichhold Technology Brasil*, empresa multinacional com sede nos Estados Unidos e de grande tradição na produção de resinas e aditivos de uso industrial. Trata-se de uma resina poliéster insaturada isoftálica, totalmente polimerizável, com média reatividade, não acelerada e acrescida da barreira química Neopentil Glicol, aditivo que tem a função de fortalecer a resistência mecânica da resina diante dos fatores

climáticos: umidade e radiação ultravioleta. As características principais desta resina estão dispostas na tabela 3.1, fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.1. Características da resina náutica RESAPOL 10134 (Adaptado do Boletim técnico Reichhold, 2000).

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISE	ESPECIFICAÇÃO
Matéria Seca 1g/1 ml Toluol/1 h/120° C (%)	PP 01 - 497	54 - 56
Índice de Acidez (MgKOH/g)	PP 01 - 003	22 máx
Viscosidade Brookfield LVT, 25° C, Sp3 – 60 rpm (cp)	PP 01 - 124	320 - 480
Curva Exotérmica	PP 01 - 296	190
Tempo de gel (min)	PP 01 - 296	6 - 8
Temperatura Máxima (°C)	PP 01 - 296	110

A resina foi armazenada e preparada para sua aplicação na indústria Tecniplas Tubos e Conexões LTDA, localizada no distrito industrial de São Gonçalo do Amarante - RN. O tempo de gel foi ajustado para 15 minutos em adequação ao processo de impregnação, por tratar-se de função direta com a temperatura ambiente. Seguiu-se para tanto as concentrações de acelerador de 0,7% para o painel **BMJ** e de 1% para os demais biocompósitos desenvolvidos e o catalisador foi de 1,5%, ambos conforme limites informados pelo boletim técnico fornecido pela fabricante (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Concentrações recomendadas para uso da resina náutica RESAPOL 10134 (Adaptado do Boletim técnico Reichhold, 2000).

CONCENTRAÇÕES DE ACELERADOR/CATALISADOR	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Naftenato ou Octoato de Cobalto a 6% de Metal	0,1%	1%
Peróxido de Metil Etil Cetona	0,7%	2,5%

### 3.1.2. Resíduos de Madeira

Os resíduos de diversos tipos de madeira foram coletados em madeiras da cidade de Natal – RN. Inicialmente eles foram reservados, por um período de dois meses, em local protegido de luz solar e da umidade, quando foi iniciado o tratamento dos mesmos no Laboratório de Cerâmicas da UFRN.

Os resíduos foram desidratados em estufa de circulação e renovação do ar Tecnal TE-394/1 por 24 horas a 80°C. Em seguida estes foram fragmentados, com o objetivo de se obter as granulometrias desejadas, através do processo de moagem em moinho excêntrico do tipo BP Engenharia CB2-T, indicado para materiais úmidos ou secos, com tempo de fragmentação de 15 minutos, para a repetição das características granulométricas.

Após a fragmentação, os resíduos de madeira foram classificados em termos de granulometria através da norma ASTM E11-95. Foram utilizadas peneiras com mesh 27 de limite em 0,6 mm, com mesh 10 de limite de abertura de até 1,7 mm e com mesh 8 de limite de passagem de resíduos em 2,36 mm. As principais etapas do processo de obtenção das granulometrias desejadas podem ser visualizadas na figura 3.1.



Figura 3.1. a) Estufa para o condicionamento dos resíduos de madeira; (b) Acondicionamento dos resíduos; (c) Fragmentação em moinho excêntrico (d) Peneiramento e classificação dos resíduos.

Após a classificação, a maior parte dos resíduos ficou com a granulometria intermediária de até 1,7 mm. Após um reprocessamento utilizando as sobras de resíduos maiores que 2,36 mm, restaram ainda 16,5% de resíduos que não puderam ser mais fragmentados e classificados dentro dos parâmetros de tamanho de resíduos adotados para este trabalho, sendo, portanto descartados.



O aproveitamento dos resíduos de madeira provenientes de serrarias, para a produção de biocompósito com capacidade de ser reciclado, embora não consiga absorver todo o volume de materiais naturalmente dispostos no lixo urbano, permite reduzir em aproximadamente 83,4% do desperdício de material coletado.

### 3.1.3. Tecido Bidirecional de fibras de Juta

O tecido bidirecional de fibras de juta (a fibra na forma *in natura*) utilizado na fabricação de todos os biocompósitos desenvolvidos foi o de trama fechada sem tingimento e com gramatura de 308 g/m<sup>2</sup> (fig. 3.2).

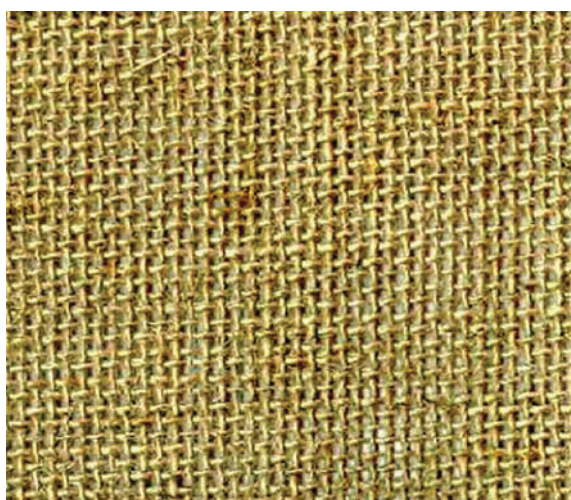


Figura 3.2. Amostra do tecido bidirecional de fibras de juta com trama fechada.

Apesar do uso corrente de diversos tratamentos superficiais em fibras vegetais com o objetivo de diminuir sua natural característica hidrofóbica, para efeito destes experimentos foram descartados quaisquer tipos de modificações superficiais que tornasse a produção destes biocompósitos mais lenta, onerosa ou complexa do que a de outros materiais não compósitos.

## 3.2. Fabricação e Configuração dos Biocompósitos

De forma a facilitar o entendimento do trabalho, o biocompósito de madeira/juta na forma de painel sanduíche será especificado apenas como **painel BMJ**, enquanto que o biocompósito de fibras de juta na forma de laminado será especificado como **laminado BJ**. A seguir, descrições detalhadas serão realizadas com relação às configurações idealizadas, processos e técnicas de fabricação envolvidas.

### 3.2.1. Painel Sanduíche Biocompósito Madeira/Juta – Painel BMJ

O Biocompósito Madeira/Juta (painel **BMJ**) trata-se de um material compósito na forma de painel sanduíche, com capacidade de reciclagem. Na figura 3.3 (a e b) mostram-se a face externa e a seção longitudinal (espessura) do painel **BMJ**. O processo de fabricação utilizado foi o de laminação manual executado pela indústria Tecniplas Tubos e Conexões LTDA.

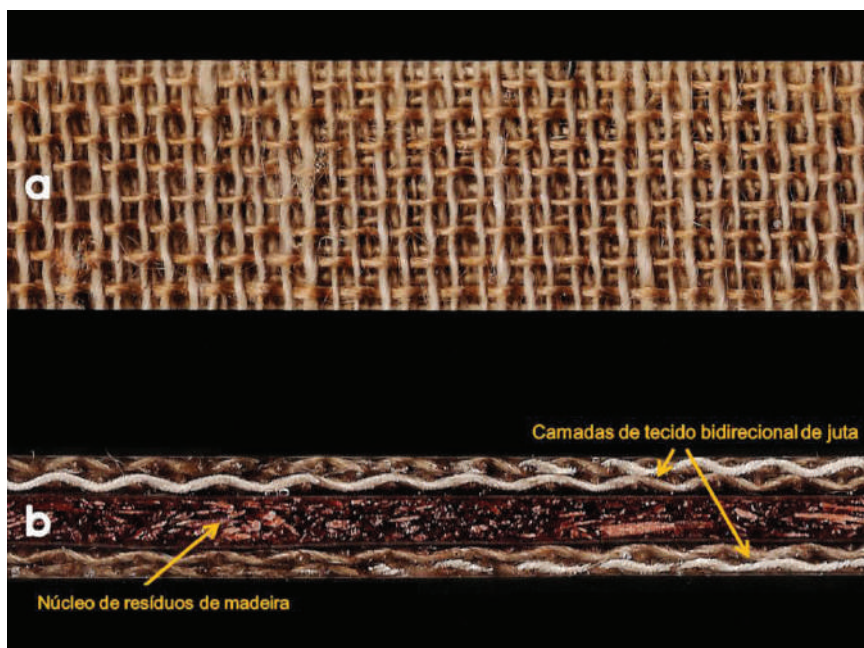


Figura 3.3. a) Face do painel **BMJ**; b) Seção longitudinal do painel **BMJ**.

A configuração do painel **BMJ** consiste de uma matriz polimérica de resina poliéster isoftálica aditivada com **NPG**, comercialmente conhecida como resina náutica, reforçada por duas camadas externas de tecido bidirecional de fibras de juta, intercaladas por uma camada central (núcleo) de resíduos de madeira processados. As fibras de juta, na forma *in natura*, estão dispostas a 0/90° com relação à direção de aplicação da carga.

Inicialmente foi confeccionado um molde aberto em vidro para a laminação do núcleo de resíduos de madeira processados. A base inferior do molde foi forrada com uma camada de resina e em seguida foi colocada uma camada de véu de poliéster. A função do véu é de isolamento do núcleo de resíduos de madeira com relação às demais camadas de fibras de juta, resultando assim em camadas do painel sanduíche bem definidas.

Os resíduos, já impregnados com a resina, foram colocados sobre o véu e espalhados de forma a uniformizar a espessura da camada. Essa espessura foi obtida com a ajuda de marcadores impressos na lateral do molde em vidro para o controle da mesma

resultar de até 3 mm. Por último foi colocada outra camada de véu sobre os resíduos e todo o conjunto foi removido do molde para ser imediatamente adicionado ao restante das camadas do painel (fig. 3.4c).

Enquanto se preparava a confecção da camada do núcleo, duas camadas de tecido de fibras de juta foram laminadas em um molde à parte, para em seguida sobre as mesmas, ser colocado o núcleo. Após a colocação do núcleo mais duas camadas de tecidos de fibras de juta foram laminadas, completando dessa forma a concepção final do painel com distribuição simétrica das camadas em volta do núcleo. Com efeito de melhorar o acabamento externo, uma camada de filme de teflon com cera desmoldante revestiu a parte superior do material resultando numa composição de camadas de dimensões 70 x 50 e aproximadamente 9,0 mm de espessura final. Na figura 3.4 ilustram-se algumas etapas do procedimento descrito.



Figura 3.4. a) Mistura dos resíduos de madeira com a resina náutica; b) montagem do núcleo em molde aberto; c) transporte do núcleo impregnado sobre as camadas de tecido bidirecional de fibras de juta já laminadas e d) acabamento final do painel **BMJ**.

Com relação ao percentual de peso da mistura de resíduos de madeira/resina, foi colocado 400 gramas de resíduos processados de madeira embebidos em 1.100 gramas de resina com 7 ml de catalisador. Devido ao elevado nível de viscosidade da resina náutica com NPG quando em contato com reforços naturais, foi adotado um valor de catalizador



inferior ao comumente recomendado para efeito de retardar a cura e facilitar a preparação e laminação do núcleo sobre as primeiras camadas.

Na figura 3.5 é possível visualizar, por meio de simulação 3D, a formação da configuração final do painel **BMJ** com todos os seus componentes. Ressalta-se que as camadas transparentes de resina não se separam durante o processo de confecção, já que as mesmas são impregnadas diretamente nas camadas de reforço do painel.

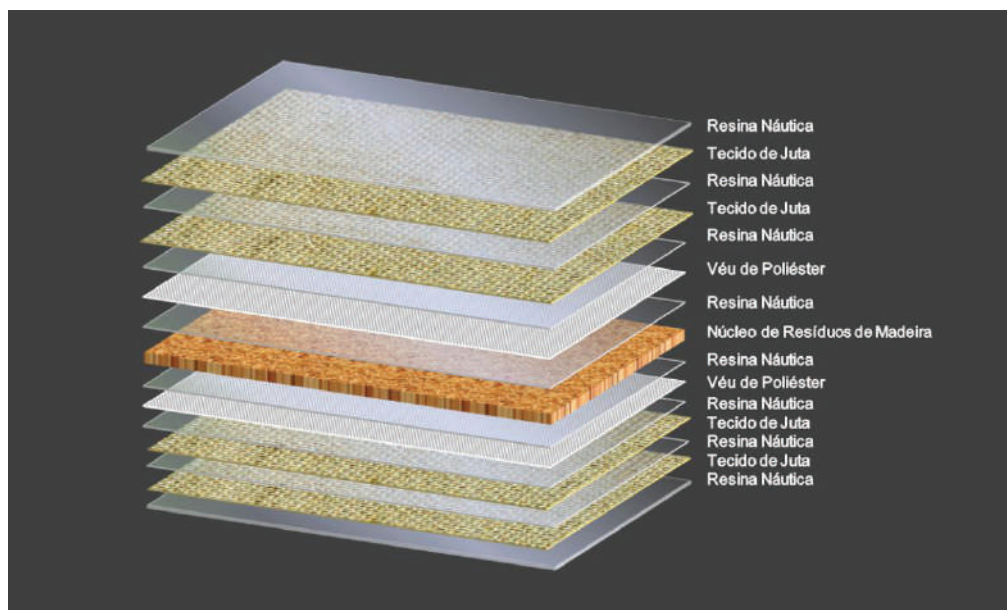


Figura 3.5. Configuração simulada em 3D do painel **BMJ**.

### 3.2.2 Laminado Biocompósito de Fibras de Juta – Laminado BJ

O biocompósito somente de fibras de juta (**BJ**) trata-se de um compósito do tipo laminado. O mesmo foi obtido a partir da mesma resina utilizada no painel **BMJ**, reforçada por quatro camadas de tecido bidirecional de fibras de juta, também o mesmo tecido usado para as camadas externas do painel **BMJ**.

Na figura 3.6 (a e b) são ilustradas a face externa e a seção longitudinal (espessura) do laminado **BJ**, enquanto que na figura 3.7 ilustra-se a simulação 3D da configuração e os componentes do laminado **BJ**.

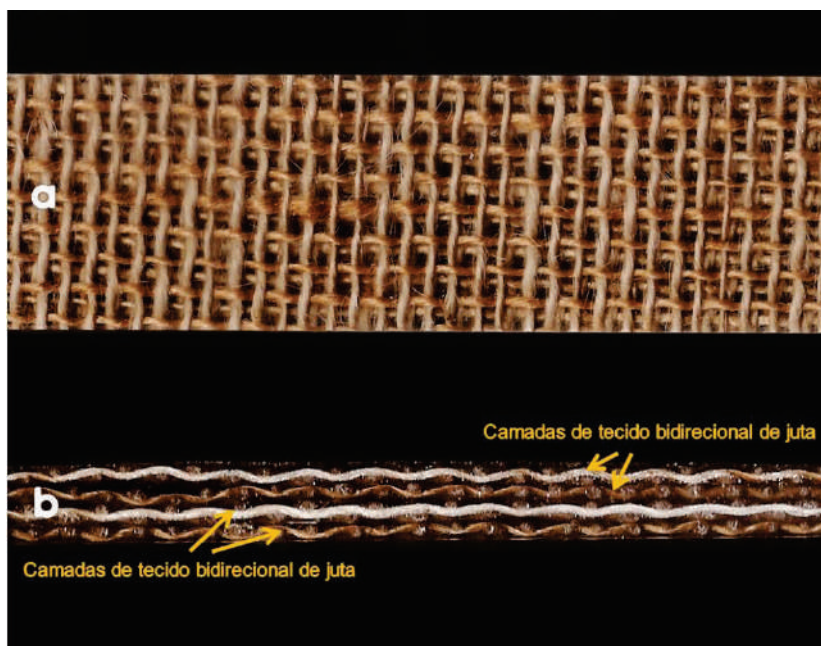


Figura 3.6. a) Face externa do laminado **BJ** e b) Seção longitudinal do laminado **BJ**.

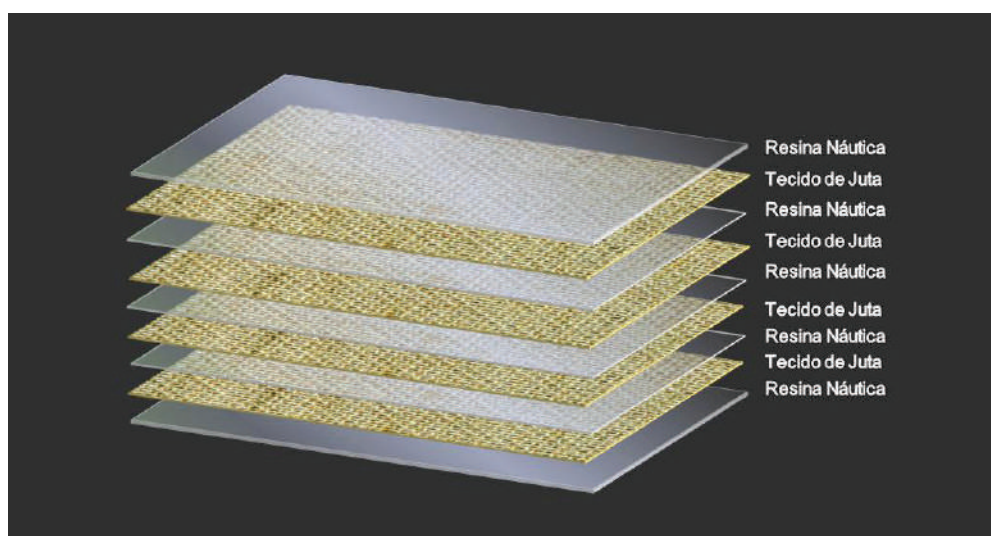


Figura 3.7. Configuração simulada em 3D do laminado **BJ**.

O processo de fabricação utilizado foi o de laminação manual executado pela indústria Tecniplas Tubos e Conexões LTDA. A resina foi acelerada com acréscimo de 10 ml de catalisador, valor normalmente utilizado para o processo, diferente do que ocorreu na preparação do painel **BMJ**, já que não havia necessidade de retardar o processo devido à ausência de um núcleo.

A base onde foi confeccionado o laminado **BJ** foi previamente forrada com um filme desmoldante e sobre ele foi pincelada uma camada de resina, para dar-se início ao processo de impregnação. Quatro camadas sobrepostas de tecido de fibras de juta de 700 x 500 mm foram montadas uma a uma, de forma a se obter a espessura desejada para o

laminado. Para melhoria do acabamento superficial foi colocado um filme de teflon revestindo a parte superior do material.

Para o acabamento final os laminadores dispuseram de uma espátula para retirar as irregularidades e bolhas em formação na superfície. As dimensões finais para o laminado **BJ** foram de 700 x 500 mm com aproximadamente 5 mm de espessura final. Na figura 3.8 mostram-se algumas etapas do processo de fabricação.



Figura 3.8. Laminação manual do laminado **BJ** e seu acabamento final.

### 3.2.3. Reciclagem do Painel BMJ – Painel BMJ-R

O painel **BMJ-R** é um projeto de reaproveitamento e aumento do ciclo de vida do painel **BMJ** por meio da reciclagem dos materiais: resíduos de madeira e fibras de juta, após passarem pelo teste de envelhecimento ambiental acelerado em câmara.

De forma mais clara, o novo painel foi configurado assim como o original, porém seu núcleo, agora com presença do processo de hibridização, foi composto por fibras de juta e os resíduos de madeiras recicladas, empregados no painel original **BMJ** e posteriormente envelhecido.

Na figura 3.9 (a e b) mostram-se a face e seção longitudinal do novo painel reciclado **BMJ-R**. O mesmo processo de fabricação utilizado para os biocompósitos anteriores foi usado para a obtenção do painel reciclado e também executado pela indústria Tecniplas Tubos e Conexões LTDA.



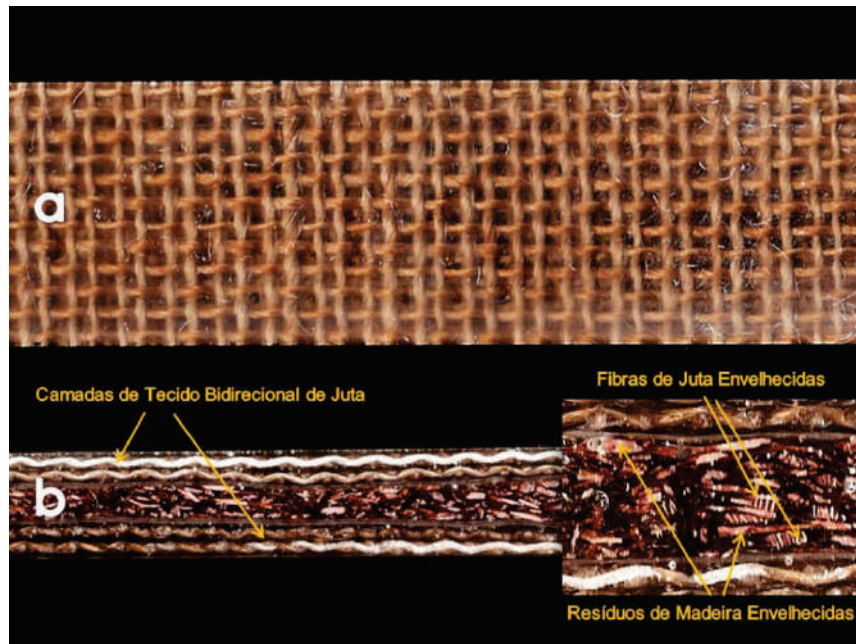


Figura 3.9. a) Face externa do painel **BMJ-R** e b) Seção longitudinal do painel **BMJ-R** com detalhe do núcleo ampliado.

Antes de iniciada a fabricação do novo painel reciclado, os corpos de prova envelhecidos e já ensaiados foram fragmentados em moinho excêntrico do tipo BP Engenharia CB2-T no Laboratório de Cerâmicas da UFRN por 5 horas até que formassem resíduos sem a presença de lâminas de resina. Na figura 3.10 podem-se observar o estado do material fragmentado após os principais passos deste processo. Observam-se nas duas últimas imagens (3.10 c e d) partes mais escura correspondendo aos resíduos da madeira e partes mais claras (e volumosas) correspondendo às fibras de juta trituradas.

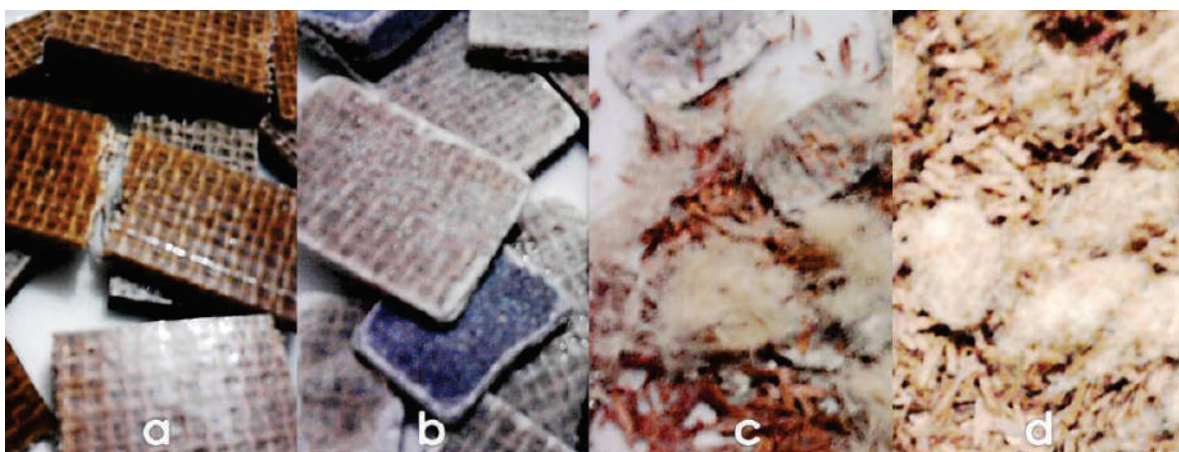


Figura 3.10. Evolução do processamento do reforço do núcleo do painel **BMJ-R**: a) Corpos de prova envelhecidos partidos com martelo; b) Material fragmentado ainda com resina; c) Material processado ainda com partes do compósito; d) Material após processamento.

Após a retirada, por peneiramento dos resíduos de resina náutica, os reforços de madeira e de juta foram separados e reprocessados. Os resíduos de madeira foram novamente moídos por 15 minutos para se retirar destes as últimas partes de resina, o processo serviu também para se atingir a granulometria adotada na fabricação do núcleo do painel **BMJ** original.

As sobras de resíduos de madeira, ou seja, partículas superiores ao mesh 8 foram novamente fragmentados pelo tempo de 30 minutos para aumentar o percentual de reaproveitamento de material.

Já os resíduos de juta foram novamente processados por 20 minutos até que perdesse a estrutura de tecido, os filamentos de fibra de juta ainda com a presença de resina demonstraram a formação de nós. Para o reaproveitamento destes resíduos, eles foram cortados e separados em um triturador até que formassem partículas de dimensões aproximadas aos resíduos de madeira. Na figura 3.11 (a e b) são apresentados os materiais separados após processamento.



Figura 3.11. Separação dos materiais utilizados na obtenção do núcleo do painel **BMJ-R**:  
a) Resíduos de madeira; b) Fibras de juta trituradas.

Terminado os ciclos de processamento de resíduos de madeira e de fibras de juta foi alcançado um reaproveitamento de material de cerca de 80%.

Imediatamente antes de iniciar a confecção do novo painel, os resíduos reciclados foram novamente reunidos e misturados até formar uma farinha de material para a montagem do núcleo híbrido do painel **BMJ-R**. Um processo semelhante ao utilizado para a fabricação do painel **BMJ** foi empregado para sua reciclagem. Inicialmente os resíduos e



fibras recicladas foram misturadas mecanicamente junto a resina. Foram utilizadas as mesmas proporções de reforço e resina já adotados no painel original **BMJ**.

O molde em vidro utilizado na laminação do núcleo do painel **BMJ** foi reutilizado para a fabricação do painel reciclado. Houve, contudo algumas modificações no processo. Para reduzir as falhas típicas da laminação manual, como presença de bolhas e vazios (principalmente nas interfaces do painel) todo o painel e não somente seu núcleo foi produzido no interior do molde, seguindo a mesma ordem do processo de laminação manual adotado para o material original, já descrito aqui.

Após a laminação, o painel foi fechado com ajuda de um tampo de vidro, com o objetivo de uniformizar sua espessura, assim como para melhorar seu acabamento. Os principais passos da fabricação do painel **BMJ-R** seguem na figura 3.12 (a, b, c e d).

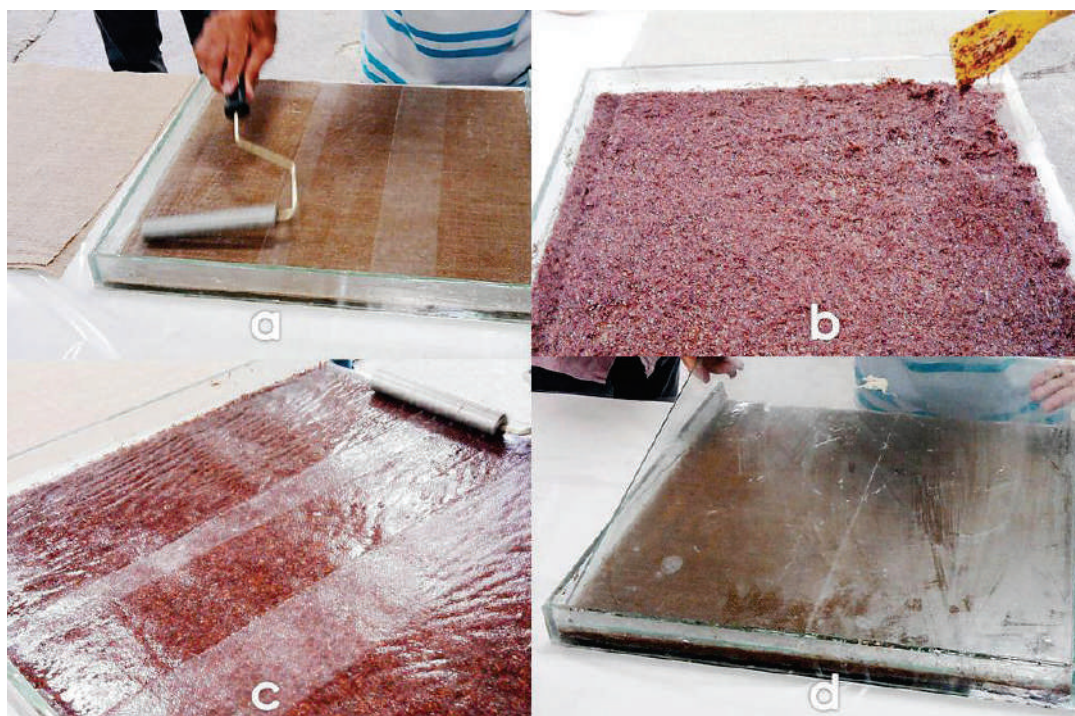


Figura 3.12. Preparação do painel **BMJ-R**: (a) Laminação das primeiras camadas de tecido de juta; (b) montagem e uniformização do núcleo; (c) montagem do véu de poliéster como limitador do núcleo e (d) acabamento final.

#### 3.2.4. A Moldagem da Placa de Resina Náutica

Com o objetivo de se conhecer realmente as propriedades mecânicas da resina náutica reforçada com Neopentil Glicol (e posterior comparação com as informações fornecidas pelo fabricante) utilizada para a fabricação dos biocompósitos painel **BMJ** e

laminado **BJ**, uma placa foi fabricada para obtenção de todos os corpos de prova necessários aos ensaios mecânicos.

As primeiras tentativas de produzir uma placa de resina com molde aberto falharam por não alcançar a estabilidade na forma e uma espessura mais regular, planejada de aproximados 5 mm. Foi desenvolvido, para tanto, um molde fechado em vidro de 500 x 500 mm, composto por duas peças maiores e seis peças menores para a regulação interna e delimitação da espessura do material, como pode ser visto no esquema da figura 3.13.

Inicialmente foram fixados à base os limitadores de espessura para em seguida ser aplicada uma camada de cera desmoldante em todas as superfícies internas que ficariam em contato com a resina durante o processo de cura. Em seguida o tampo foi acoplado e selado à base, formando assim uma abertura única de 50 x 5 mm na parte superior do molde para derramamento da resina.

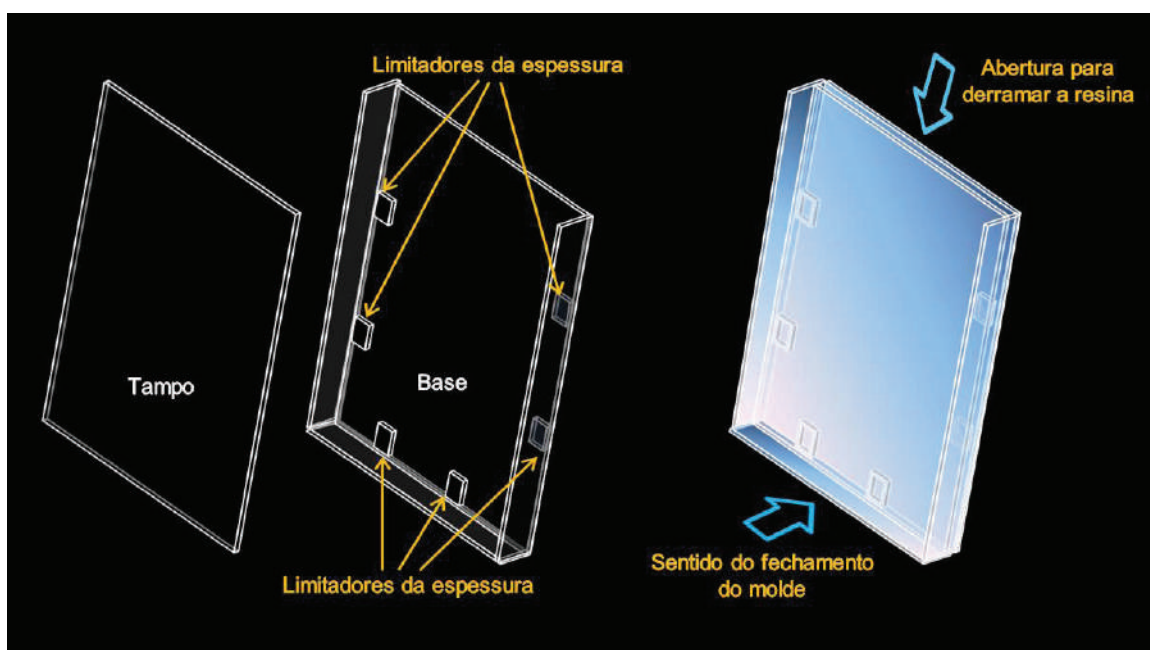


Figura 3.13. Partes e montagem do molde fechado para fabricação da placa **RN+NPG**.

A placa serviu para a obtenção do conjunto de corpos de prova para os ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos para o estado original e envelhecido, de acordo com as normas para materiais poliméricos não reforçados. Na figura 3.14. Ilustram-se algumas das etapas descritas no processo de preparação do molde fechado.





Figura 3.14. a) Fixação dos limitadores de espessura; b) Base do molde aberto; c) Pesagem da resina com o molde já fechado.

Preparado o molde, a resina foi despejada na abertura até completar a placa, como visto na figura 3.15. A placa **RN+NPG** foi desmoldada após 72 horas de cura.

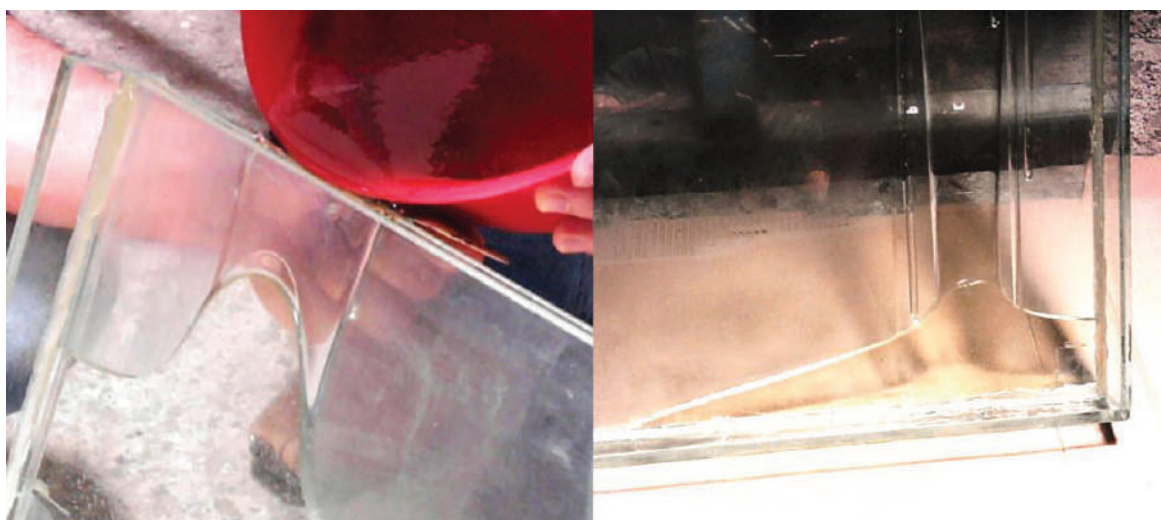


Figura 3.15. Detalhes do preenchimento do molde para o **RN+NPG**.

### 3.2.5 A Preparação dos Corpos de Prova dos Biocompósitos

Os corpos de prova do painel **BMJ** e do laminado **BJ** foram obtidos por meio de mesa de corte com disco diamantado de diâmetro de 110 mm e 20 mm de espessura BOSCH Mármore EN13236. As amostras foram preparadas de acordo com as normas específicas, quando existentes, para cada ensaio programado: tração uniaxial, flexão em três pontos, absorção de umidade e densidade. A única exceção foi à preparação das amostras para o ensaio de compressão uniaxial, onde o planejamento do corte e dimensionamento dos corpos de prova foi realizado a partir do trabalho de Mandell (1997, *apud* Vadlamani, 2007).

Após o corte, os corpos de prova tiveram suas superfícies transversais lixadas com as lixas d'água de número 100, 220, 330, 440, 600 e 1200 respectivamente. Para cada conjunto de ensaio de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão em três pontos, foram polidas algumas amostras com flanela para polimento embebida em alumina de 0,01 micron diluída com água destilada. O polimento das amostras foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFRN.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao procedimento de medições, onde as dimensões foram obtidas utilizando-se um paquímetro digital Starret 727 com precisão de 0,001 mm. Como a espessura dos corpos de prova apresentava variações em função do processo de fabricação utilizado, se fez necessário à realização de três a seis medidas, dependendo do tamanho de cada corpo de prova para obtenção do valor médio para cada amostra.

As amostras, dependendo do tipo de ensaio, ou seja, em estados original, envelhecido, úmido e reciclado, foram preparados e ensaiados oito corpos de prova. Para a obtenção das curvas médias de tensão versus deformação, foram utilizados os valores de cinco ensaios considerados válidos.

Os parâmetros encontrados foram: tensão última, módulo de elasticidade (medido na direção de aplicação da carga) e deformação de ruptura para os ensaios de tração uniaxial e compressão uniaxial. Para os ensaios de flexão em três pontos os parâmetros encontrados foram: resistência à flexão, módulo de elasticidade na flexão e deflexão máxima. Também foram calculadas todas as respectivas dispersões percentuais para cada propriedade mecânica.

### 3.2.6. A Preparação dos Corpos de Prova do RN+NPG

Os corpos de prova de **RN+NPG** foram cortados em mesa digital com painel de controle adaptado, modelo QX 1290 de corte a laser do tipo CO<sub>2</sub> para materiais plásticos, madeiras leves e tecidos, em razão da fragilidade característica da resina náutica e, sobretudo para efeito do cumprimento da norma ASTM D638-10 específica para a realização do ensaio de tração uniaxial em materiais plásticos sem reforço. Na figura 3.16 mostram-se detalhes do corte dos corpos de prova **RN+NPG**.

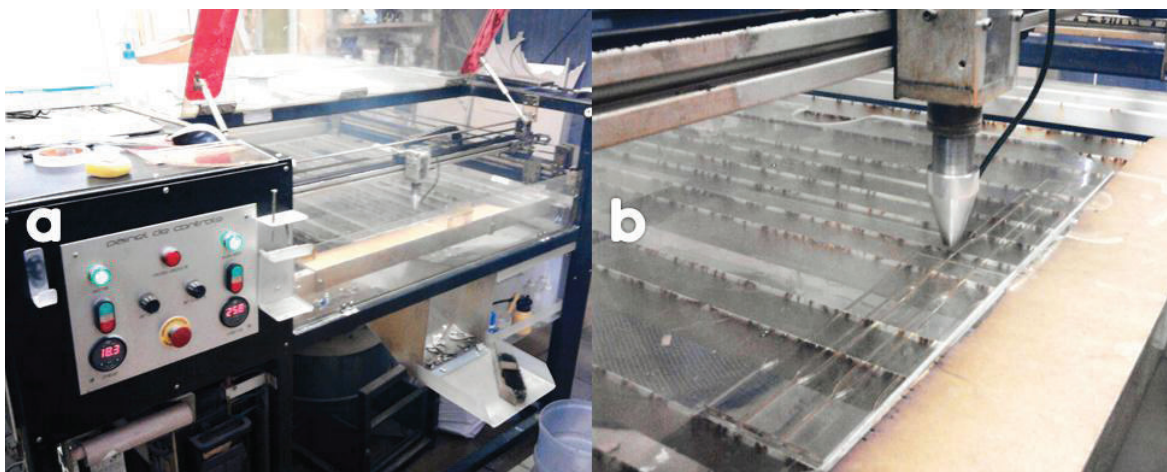


Figura 3.16. a) Mesa de corte a laser utilizada; b) Execução do corte dos corpos de prova **RN+NPG**.

A norma recomenda o uso de geometria específica, tipo *gravata*, para o corte das amostras de tração uniaxial como visualizado na simulação 3D da figura 3.17, com destaque para a área de comprimento útil (*gage*) na região central do corpo de prova (50 x 13 mm).

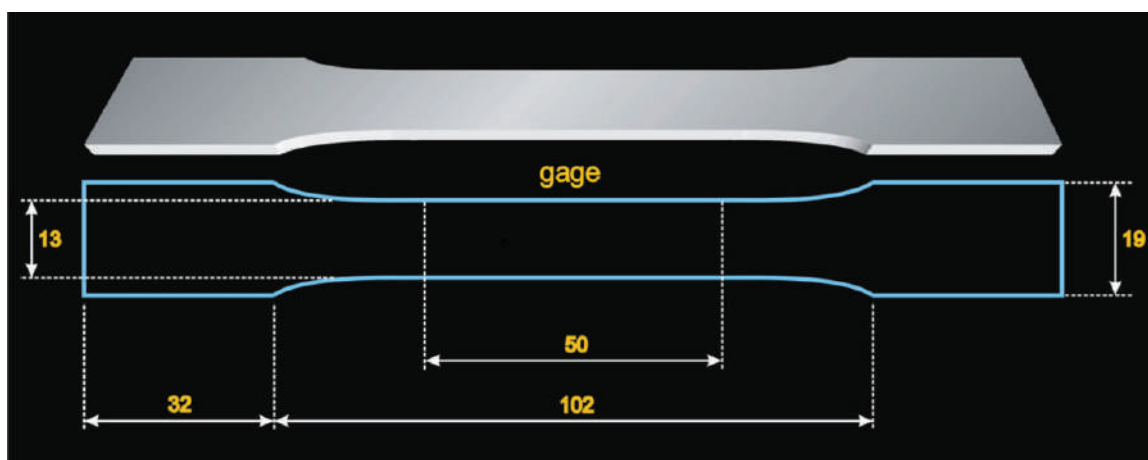


Figura 3.17. Formato e dimensões dos corpos de prova para tração uniaxial do **RN+NPG**.

### 3.3. Análise da Fratura Mecânica

A análise macroscópica da fratura tem como objetivo avaliar o modo da fratura mecânica, sua formação e propagação ao longo do comprimento do corpo de prova. A caracterização macroestrutural da fratura dos compósitos desenvolvidos foi realizada por meio de imagens de scanner HP PSC 1315 com resolução de 600ppi e 1200ppi e para os ensaios de tração uniaxial, segundo a norma ASTM D3039M-08.

A análise microscópica da fratura será apresentada tanto por meio de micrografias a partir do microscópio óptico OLIMPUS GX – 51 com software de captura de imagem INFINITY CAPTURE 1-1C, quanto a partir de micrografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) – modelo VEGA3 TESCAN HV 20 kV. A microscopia óptica tem como objetivo de avaliar a formação e propagação do dano em nível da microestrutura, já a microscopia eletrônica de varredura é efetuada na seção transversal do corpo de prova na região da fratura final.

### 3.4. Ensaios Realizados

Nesta seção serão descritos todos os procedimento e normas técnicas adotadas para a realização dos ensaios físicos, mecânicos, de deterioração por perda de massa e, bem como, dos ensaios de envelhecimento ambiental acelerado e por absorção de umidade.

#### 3.4.1. Ensaio de Tração Uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial para os corpos de prova em estado original, envelhecido, úmido saturado e reciclado (dependendo do tipo de biocompósito) foram realizados em acordo com norma ASTM D3039M-08 que tratam da medição das propriedades de tração uniaxial de materiais compósitos fabricados a partir de matrizes poliméricas. Para facilitar o entendimento de todo o estudo realizado, os corpos de prova dos biocompósitos a serem utilizados nos ensaios foram definidos como: painel **BMJ** para o estado original, painel **BMJ-U** para o estado úmido saturado, painel **BMJ-R** para a condição de reciclado e **BMJ-E** para o estado envelhecido.

No caso do laminado **BJ**, os corpos de provas foram definidos como: laminado **BJ** para o estado original e **BJ-E** para o estado envelhecido. Todos os ensaios foram realizados na máquina de ensaios SHIMADZU AG – I 500 kN do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFRN.



As amostras da **RN+NPG** foram ensaiadas em equipamento semelhante, trata-se de uma SHIMADZU, AG – I, 250 kN do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGÁS-ER) localizado em Natal - RN. A mudança de equipamento ocorreu devido ao CTGÁS-ER dispor de garras adequadas a características de fragilidade apresentada pelo polímero **RN+NPG**. Na tabela 3.3 estão descritas as principais dimensões utilizadas nos corpos de prova de cada material ensaiado.

Tabela 3.3. Dimensões médias dos corpos de prova para os ensaios de tração uniaxial.

MATERIAS	COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	GALGO (mm)	VELOCIDADE DE ENSAIO (mm/min)
Painel BMJ/ BMJ-E	250	25	9,5	127	1
Painel BMJ-U	250	25	9,5	127	1
Painel BMJ-R	250	25	9,5	127	1
Laminado BJ/BJ-E	250	25	5,5	127	1
RN+NPG	167	13*	5,0	50	5

\* Largura do comprimento útil.

Os ensaios forneceram os parâmetros necessários, descritos na seção anterior, para a determinação do comportamento mecânico dos materiais. Todos os parâmetros obtidos foram posteriormente repassados e tratados em software de construção de curvas ORIGIN PRO 8.5 para a obtenção da curva média tensão versus deformação. Este procedimento foi adotado em todos os ensaios realizados.

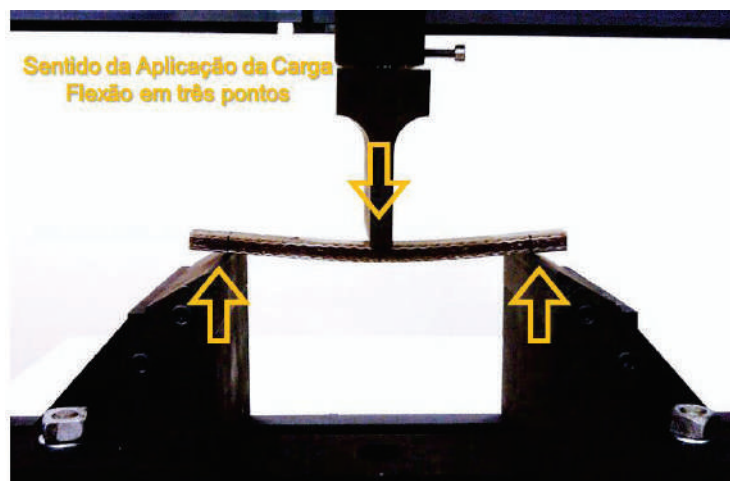
### 3.4.2. Ensaio de Flexão em Três Pontos

Todos os ensaios de flexão em três pontos foram realizados segundo a norma ASTM D 790 – 07 na máquina SHIMADZU, AG – I, 250 kN do CTGÁS-ER. Para cada material foi calculada as dimensões dos corpos de prova em razão da espessura média apresentada como pode ser visto na tabela 3.4.

Durante os ensaios realizados a base e o suporte de apoio e aplicação de carga foram ajustados e/ou substituídos para se adequarem aos parâmetros da norma adotada. Para todos os corpos de prova foi ajustado o pino de aplicação de carga para o laminado **BJ** e **RN+NPG** (fig. 3.18), enquanto que para as amostras de painel **BMJ** a aplicação de carga foi realizada por meio de base maior e suporte, desde que este tenha 1,6 vezes a espessura média de cada material ensaiado, como visto na figura 3.19.

Tabela 3.4. Dimensões médias dos corpos de prova para o ensaio de flexão em três pontos.

MATERIAS	COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	SPAN (mm)	VELOCIDADE DE ENSAIO (mm/min)
Painel BMJ/BMJ-E	180	13	9,5	150	4
Painel BMJ-U	180	13	11	145	4
Painel BMJ-R	180	13	9,5	150	4
Laminado BJ/BJ-E	100	13	5,5	80	2
RN+NPG	100	13	5,0	80	2

Figura 3.18. Ensaio de flexão em três pontos do da **RN+NPG**.Figura 3.19 Ensaio de flexão em três pontos do painel **BMJ**.

### 3.4.3. Ensaio de Compressão Uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados na máquina SHIMADZU AG I 500KN do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFRN utilizada também para os ensaios

de tração uniaxial. As garras de compressão foram projetadas segundo especificações constantes na referência (Freire Jr., 2001), ver figura 3.20.

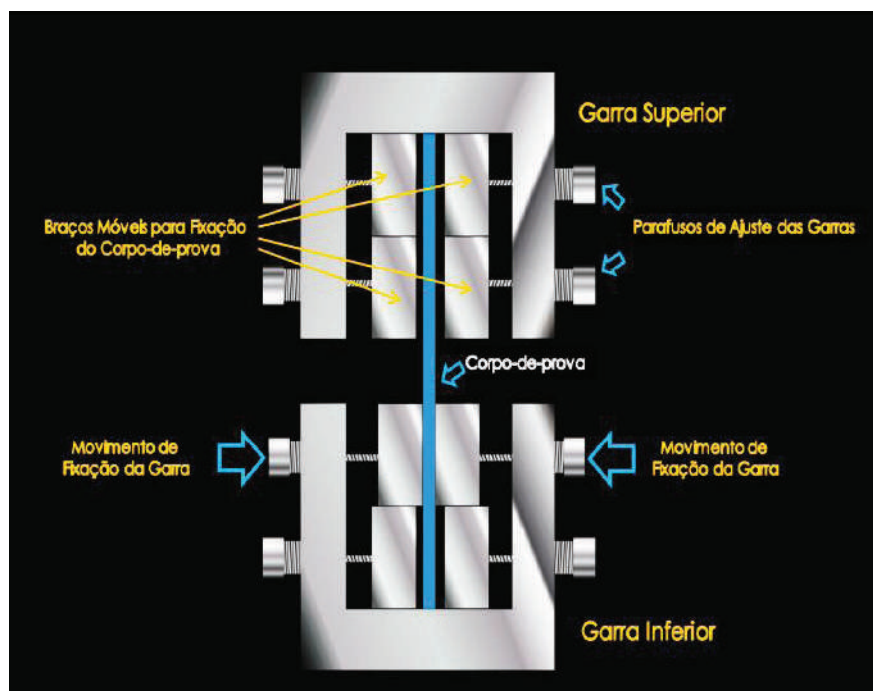


Figura 3.20. Garras de compressão uniaxial (Adaptado de Freire Jr, 2001).

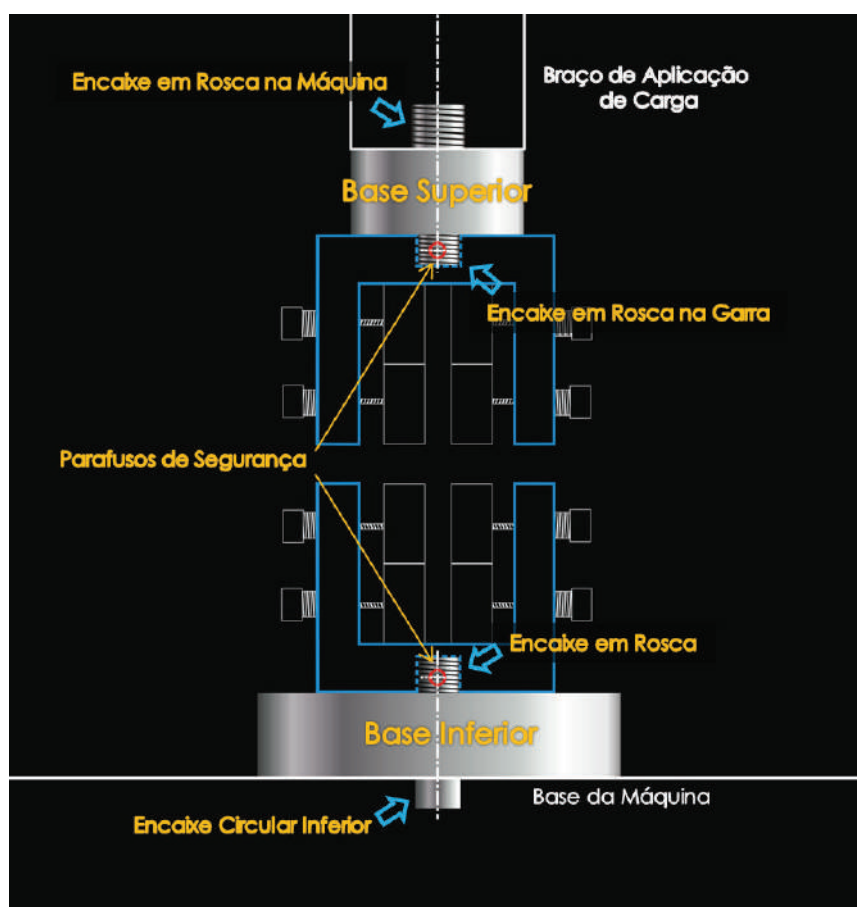


Figura 3.21. Peças desenvolvidas para ajustes da garra de compressão uniaxial.



Após a fabricação, as garras foram niveladas e ajustadas ao equipamento por meio da produção de dois adaptadores metálicos pela Oficina Mecânica da UFRN para melhorar o encaixe e evitar o deslocamento durante o ensaio. As peças desenvolvidas para os ajustes estão ilustradas na figura 3.21.

Para a realização de um ensaio de compressão, cuidados especiais foram tomados no sentido de se evitar a flambagem, principalmente quando o material possui pequena espessura. Segundo Vadlamani (2007) para se garantir que um laminado compósito não rompa por ação de flambagem, deve-se utilizar a equação 3.1 ajustando o fator de flambagem para o valor entre 12 e 15:

$$F_f = 3,46 \frac{L}{e} \quad (3.1)$$

Onde:

$F_f$  – fator de flambagem (adimensional);

$L$  – comprimento útil do corpo de prova (mm);

$e$  – espessura média dos corpos de prova (mm);

Antes da execução dos ensaios de compressão nos biocompósitos em estudo, as garras foram testadas em laminados unicamente a base de fibras de vidro e já ensaiados em trabalhos publicados na literatura (Freire Jr. *et al*, 2009) de forma a validar todos os resultados a serem obtidos. As principais dimensões adotadas para os corpos de prova para o ensaio de compressão uniaxial estão na tabela 3.5.

Tabela 3.5. Dimensões médias dos corpos de prova para os ensaios de compressão uniaxial.

MATERIAS	COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	GALGO	VELOCIDADE DE ENSAIO
Painel BMJ	125 mm	25 mm	9,5 mm	35 mm	1 mm/min
Painel BMJ-R	125 mm	25 mm	9,5 mm	35 mm	1 mm/min
Laminado BJ	140 mm	25 mm	5,5 mm	20 mm	1 mm/min

#### 3.4.4. Ensaio de Absorção de Umidade

O ensaio de absorção de umidade foi realizado de acordo com a norma ASTM D 570 - 98/05 apenas em amostras do painel **BMJ**. O ensaio de absorção de umidade foi

realizado para dois meios de imersão diferentes: água destilada e água do mar. Inicialmente foram dispostas cinco amostras (para cada condição de imersão) em estufa a 50°C, com controlador de temperatura e pesagem após 24 horas em estufa para posterior estudo comparativo.

O ensaio de umidade consiste em deixar os corpos de provas do painel **BMJ** submersos até estado de saturação de umidade ser atingido. Foram medidas as massas de cada um dos corpos de provas, antes de iniciar o ensaio (0h). Na primeira semana foram realizadas medidas diárias (24h, 48h, 72h, 96h, 120h, 144h e 168h), uma semana após iniciada a exposição à umidade (336h) foi feita nova medição e depois estas seguiram sendo realizada de cada duas semanas (14 dias) até ocorrer à saturação do mesmo ou com uma variação entre elas menor do que 1% do total de incremento no peso, ou 5,0 mg de incremento (o que acontecer primeiro), conforme estabelece a norma ASTM D 570 – 98/05.

Foi utilizada uma balança digital de precisão SARTORIUS CC 120 certificada pela ISO 9001, com grau de incerteza de 0,0001g, do Laboratório de Metrologia da UFRN. Para o cálculo do teor de absorção de umidade usou-se a equação 3.2:

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

$M_u$  – massa úmida (g);

$M_s$  – massa seca (g);

$U$  – teor de absorção de umidade (%);

Após a obtenção do estado de saturação de umidade em água destilada e água do mar, os corpos de prova foram ensaiados na tração uniaxial e flexão em três pontos. Os corpos de prova seguiram as recomendações da norma e suas dimensões são mostradas na Tabela 3.6 (tolerância de 0,8 mm).

Tabela 3.6. Dimensões médias dos corpos de prova para os ensaios de umidade.

MATERIAS	COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA
Painel BMJ	76,2 mm	25,4 mm	9,5 mm

### 3.4.5. Ensaio de Densidade Volumétrica

A densidade volumétrica dos compósitos foi determinada utilizando à norma ASTM D 792-08. Foram confeccionadas amostras de 25x25 mm, as quais foram previamente medidas e pesadas em uma balança digital com capacidade máxima de 210g e resolução de 0,1 mg. A densidade volumétrica dos compósitos foi calculada utilizando a equação 3.3.

$$D = \frac{a * \eta}{a + w - b} \quad (3.3)$$

Onde:

D – densidade volumétrica do compósito (g/cm<sup>3</sup>).

a – Peso da amostra seca (g);

$\eta$  – densidade da água na temperatura de ensaio a 23°C (0,9975 g/cm<sup>3</sup>)

w – peso do afundador parcialmente imerso em água (g);

b – peso da amostra imersa com o afundador em água (g);

### 3.5. Teste de Envelhecimento Ambiental Acelerado

A norma ASTM G 53 - 96 cobre os princípios básicos e procedimentos para a construção de equipamento para a simulação de deterioração ambiental causada por luz solar e água na forma de chuva ou de umidade relativa. Acrescenta-se a esta a norma ASTM G 151 - 2009, que trata do envelhecimento de materiais não-metálicos em equipamentos para teste de aceleração por exposição a luz.

Outras referências complementares a ASTM G 53-96 são:

- ASTM E 220-07a – Trata da calibragem de pares termoeletrônicos por comparação;
- ASTM E 691-11 – Aborda a verificação da precisão de testes inter-laboratoriais;
- ASTM G7/GM7-11 – Trata da exposição atmosférica de materiais não metálicos;

#### 3.5.1. Câmara de Envelhecimento Acelerado

O equipamento para o teste de envelhecimento ambiental de modo acelerado utilizado no PPGEM/UFRN foi construído a partir de um projeto DCR/CNPq, segundo normas especificadas anteriormente, sendo esta formada por três unidades específicas.

Na unidade de controle fica armazenado todo o mecanismo de acionamento do processo de envelhecimento, que são as chaves de acionamento das lâmpadas para geração de radiação ultravioleta e para a geração do vapor aquecido e os disjuntores de segurança da parte elétrica da câmara. Os reatores, a fiação e demais componentes utilizados na instalação elétrica estão acondicionados na parte traseira desta unidade.

Na unidade de condicionamento dos corpos de prova, os mesmos são posicionados em uma estrutura metálica com tampa para mantê-los isolados do ambiente externo. Neste módulo ficam armazenadas quatro lâmpadas fluorescente REFLEXPOWER, gerando a radiação ultravioleta com potência de 80W cada uma. Nas laterais duas ventoinhas possibilitam o condicionamento interno da câmara, com acionamento contínuo durante todo o período de envelhecimento.

Internamente há uma grade, com dois apoios um superior e outro inferior para a colocação das amostras de comprimento padrão dos corpos de prova. Completando os espaços vazios são utilizadas placas para evitar que a parte oposta dos corpos de prova seja atingida pelos fatores climáticos. Nesta unidade estão posicionados três termo-higrômetros com os seus respectivos sensores posicionados junto aos suportes das amostras de biocompósitos poliméricos, objetivando medir com maior precisão a temperatura e umidade.

Na unidade de armazenamento de água, localizada no exterior da câmara há um compartimento que recebe e armazena a água e envia o líquido para um reservatório interno à câmara. O suprimento de água é controlado automaticamente por meio de uma boia. São igualmente aceitas, segundo as normas citadas, água do tipo potável, destilada ou deionizada, desde que não interfiram no processo de condensação. Neste teste foi adotada o primeiro tipo. O reservatório interno com altura de, no mínimo, 25 mm de água, possui um mecanismo de condensação que gera o ciclo de umidade por vapor e a espalha por toda a área de suporte dos corpos de prova.

Nas figuras 3.22 e 3.23 são observados, respectivamente, as três unidades da câmara de envelhecimento fechada e as principais partes do aparelho aberto.

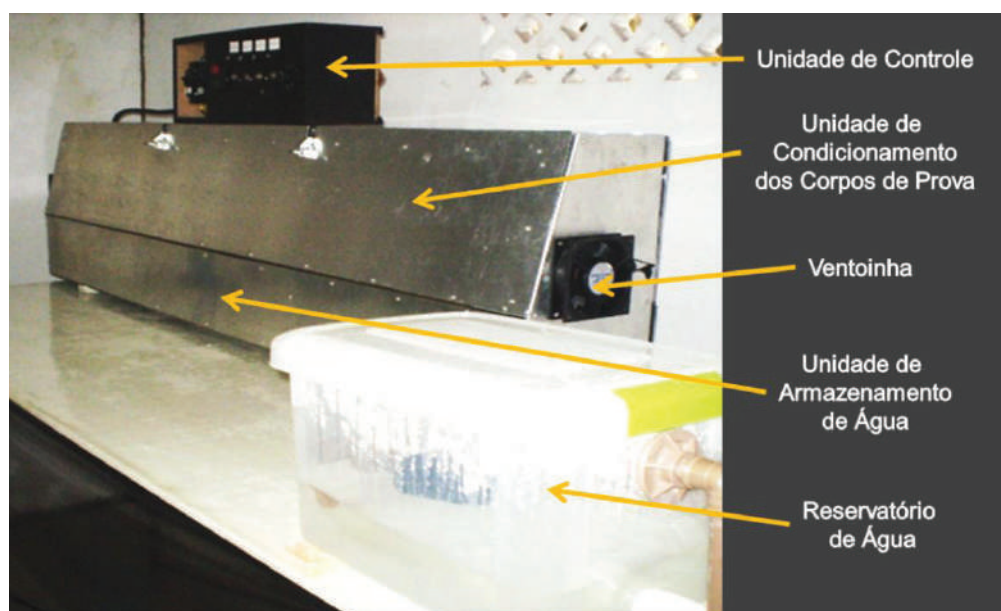


Figura 3.22. Unidades da câmara de envelhecimento acelerado (Felipe R., 2012).

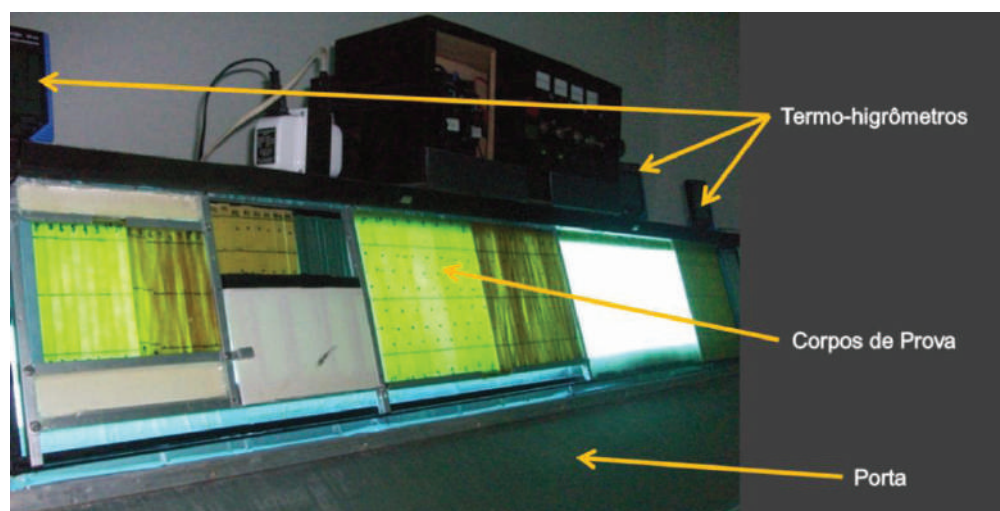


Figura 3.23. Vista interna da câmara de envelhecimento em funcionamento (Felipe R., 2012).

### 3.5.2. Procedimento e Controle Contínuo do Envelhecimento Acelerado

Os corpos de prova foram expostos, alternadamente, a raios ultravioletas e a um processo de condensação de água em forma de vapor aquecido em ciclos diários de envelhecimento ambiental até atingir o número de horas de exposição exigido pela norma. O ensaio de envelhecimento durou um período total de 2016 h, com reposicionamentos semanais dos corpos de prova, coincidindo com a retirada destes para as pesagens, a fim de se garantir a uniformidade do processo de envelhecimento. Na tabela 3.7 são apresentados os principais dados do teste de envelhecimento acelerado.



Tabela 3.7. Dados dos ciclos de envelhecimento ambiental acelerado.

FATORES AMBIENTAIS	CICLO DIÁRIO (h)	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA INTERNA (° C)	VARIAÇÃO DE UMIDADE (%)	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EXTERNA (° C)	PERÍODO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO (h)
UV	18	50,1 – 59,2	45,0 – 54,3	27,5 – 31,0	1.512
Umidade	06	46,5 – 52,0	48,0 – 74,3	32,4 – 35,3	504
Total	24	46,5 – 59,2	45,0 – 74,3	27,5 – 35,3	2.046

Para a pesagem foi utilizada uma balança digital de precisão SARTORIUS CC 120 certificada pela ISO 9001, de grau de incerteza de 0,0001 grama, do Laboratório de Metrologia da UFRN (fig. 3.24).



Figura 3.24. Pesagem dos corpos de prova durante envelhecimento acelerado.

A temperatura da sala, onde esteve localizada a câmara de envelhecimento, foi medida diariamente duas vezes, a cada troca de ciclos por um termômetro externo, localizado à aproximadamente 1.500 mm do solo e a pelo menos 300 mm de qualquer fonte de calor, como recomendado pelas normas adotadas. A temperatura interna da câmara foi medida por três termo-higrômetros com precisão de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  dentro de limites entre  $30^{\circ}\text{C}$  e  $80^{\circ}\text{C}$  com mostradores dispostos externamente a câmara para facilitar a leitura.

Durante todo o teste, a temperatura interna não variou mais que  $3^{\circ}\text{C}$ , ainda assim os três medidores foram reposicionados periodicamente para minimizar qualquer efeito da variação de temperatura e de umidade no interior da câmara durante o teste.

A deterioração dos materiais, ocorrida durante o teste, foi determinada a partir da medida de perda de massa dos corpos de prova, em relação a pesagem dos corpos de prova originais. Esta perda de massa foi obtida por meio de pesagens programadas tanto após o ciclo de vapor aquecido quanto após o ciclo de radiação UV. Esse procedimento teve como objetivo entender, de forma mais clara todo, o processo de envelhecimento atuante de forma cíclica nos corpos de prova. Ressalta-se ainda que antes da colocação dos corpos de prova na câmara de envelhecimentos os mesmos foram acondicionados por 24h em estufa de forma a padronizar o peso dos mesmos para posterior estudo comparativo.

### 3.5.3. Medição da Variação de Massa Durante o Ensaio de Envelhecimento

De acordo com a lei de difusão de Fick a fórmula para o cálculo da porcentagem de massa seca da amostra, para a observação da perda média após períodos de envelhecimento na câmara de teste, foi adaptada para a equação 3.4:

$$M = \left| \frac{M_e - M_o}{M_o} \right| * 100 \quad (3.4)$$

Onde:

M – perda percentual de massa (%)

M<sub>e</sub> – massa do corpo de prova envelhecido (g);

M<sub>o</sub> – massa do corpo de prova no estado original (g);

A medição da variação de massa foi efetuada nos corpos de prova de tração uniaxial. As pesagens foram realizadas antes de iniciado o teste, semanalmente e de modo alternado, durante os 84 dias de ensaio e ao término deste, imediatamente ao final de cada ciclo de exposição a cada um dos fatores climáticos utilizados (radiação UV e vapor aquecido) tendo por objetivo a identificação de qual de tipo de intempérie ocasionou a maior deterioração por perda de massa na resina e nos biocompósitos envelhecidos.

Os corpos de prova foram colocados em uma estufa à temperatura de 50 ±3 °C, durante 24 horas, antes de serem condicionados na câmara de envelhecimento, para que houvesse a retirada da umidade e a uniformização do peso, servindo então de referência para o início do estudo comparativo posterior.



## CAPÍTULO IV

### 4 RN+NPG - RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Neste capítulo descrevem-se as propriedades mecânicas da resina náutica **RN+NPG** nos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos. Também foi observada a característica macroscópica da fratura, assim como a deterioração dimensional apresentada pela perda de massa decorrente do envelhecimento ambiental acelerado, ou seja, após exposição aos ciclos de radiação ultravioleta e de vapor aquecido.

#### 4.1. Propriedades Mecânicas

Com o objetivo de não se pautar apenas nos dados referentes às principais propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante, se fez necessário à realização dos ensaios mecânicos de tração uniaxial e flexão em três pontos na resina para servir de ponto referencial da interferência da matriz no desempenho dos novos biocompósitos.

##### 4.1.1. Desempenho Mecânico da RN+NPG na Tração Uniaxial

O diagrama de tensão versus deformação da **RN+NPG** no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 4.1.

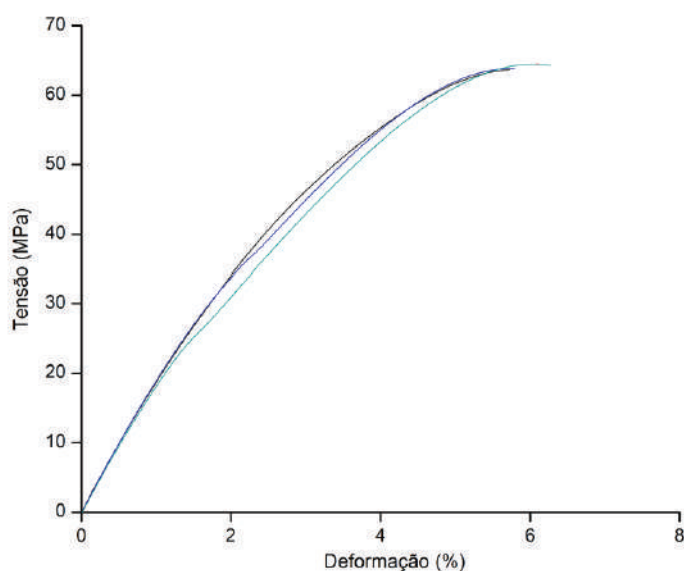


Figura 4.1. Diagrama de tensão versus deformação do **RN+NPG** na tração uniaxial.

A resina apresenta um perfil uniforme com sobreposição de algumas curvas, resultante da pequena dispersão encontrada nos resultados. Na tabela 4.1 são apresentados os resultados determinados em termos dos valores médios de tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa) e deformação de ruptura (%); além dos valores de suas respectivas dispersões percentuais. Ressalta-se aqui que para todos os ensaios mecânicos realizados a dispersão é determinada como diferença absoluta entre os valores máximos e mínimos encontrados.

Tabela 4.1. Propriedades mecânicas da **RN+NPG** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	64,08	0,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,63	4,9
Deformação de Ruptura (%)	6,02	4,0

#### 4.1.2. Desempenho Mecânico da RN+NPG na Flexão em Três Pontos

O diagrama de tensão versus deflexão da **RN+NPG** obtido no ensaio de flexão em três pontos é apresentado na figura 4.2.

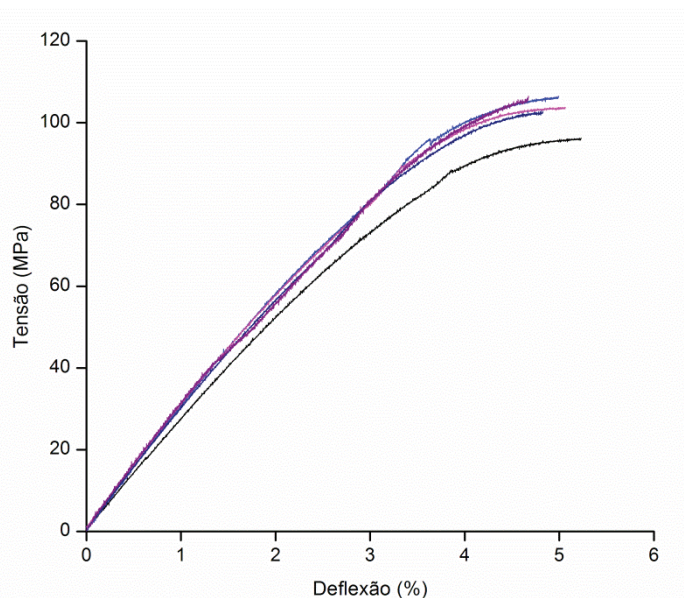


Figura 4.2. Diagrama de tensão versus deflexão do **RN+NPG**.

O perfil do comportamento mecânico na flexão apresenta-se uniforme, ou seja, com mesmas características aos apresentados no ensaio de tração uniaxial. Na tabela 3.2 são apresentados os resultados dos valores médios de tensão de flexão (MPa), módulo de

elasticidade (GPa) e deflexão máxima (%); assim como dos valores de suas respectivas dispersões percentuais. A dispersão manteve-se reduzida.

Tabela 4.2. Propriedades mecânicas da **RN+NPG** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão de Flexão (MPa)	103,10	3,3
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,87	3,8
Deflexão Máxima (%)	4,90	6,5

#### 4.1.3. Comparativo: Desempenho Mecânico x Dados do Fabricante

Os valores alcançados pela **RN+NPG** nos ensaios realizados ficaram próximos dos limites apresentado em boletim técnico (2000) e do guia de produtos da *Reichhold Technology Brasil* (2008) conforme se observa na tabela 4.3.

Tabela 4.3. Comparativo entre propriedades mecânicas da **RN+NPG** registradas em ensaio e segundo dados do fabricante.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	ENSAIOS REALIZADOS	DADOS DO FABRICANTE
Tensão Última (MPa)	64,08	60
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,63	2,0
Tensão de Flexão (MPa)	103,10	115
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,87	3,2

## 4.2. Característica da Fratura

Os corpos de prova da resina náutica com Neopentil Glicol romperam de maneira frágil, com observada ausência de qualquer tipo de formação de microfissuras anteriores a fratura final (catastrófica), independente do tipo de carregamento.

No ensaio de tração uniaxial, as fraturas ocorreram na região mediana do comprimento útil do corpo de prova (galgo) como visto na figura 4.3. No ensaio de flexão em três pontos a fratura se mostra também de forma frágil e na região central, ou seja, entre os apoios (span), como visto na figura 4.4. É importante notar que os corpos de prova não apresentaram deflexão permanente ao longo da seção longitudinal.



Figura 4.3. RN+NPG - Corpo de prova ensaiado na tração uniaxial.

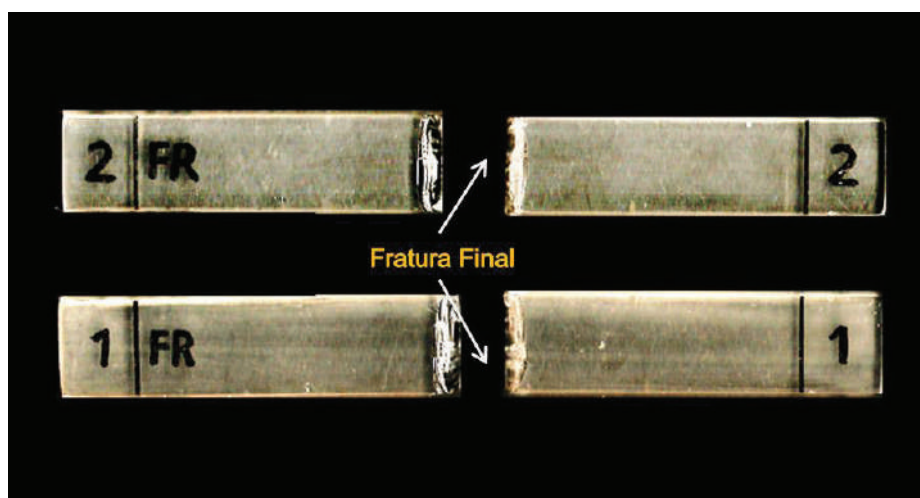


Figura 4.4. RN+NPG - Corpos de prova ensaiados na flexão em três pontos.

### 4.3. Deterioração e Perda de Massa no Envelhecimento Ambiental

Dois conjuntos de amostras de RN+NPG, uma para tração uniaxial e outra para a flexão foram dispostos na câmara de envelhecimento juntamente aos compósitos. O objetivo não era ensaiar-los após a degradação, mas observar o comportamento da resina, estudando sua influência no envelhecimento acelerado dos biocompósitos com ela fabricados, sobretudo quanto à perda de sua massa.

#### 4.3.1. Deterioração e Perda de Massa da RN+NPG

Os percentuais de perda de massa do RN+NPG são apresentados na figura 4.5 com a perda média obtida após período de exposição à radiação ultravioleta e ao vapor aquecido durante o mesmo tempo de ensaio, ou seja, 84 dias de exposição. Trata-se de valores médios obtidos nos corpos de prova de tração uniaxial através da pesagem periódica.

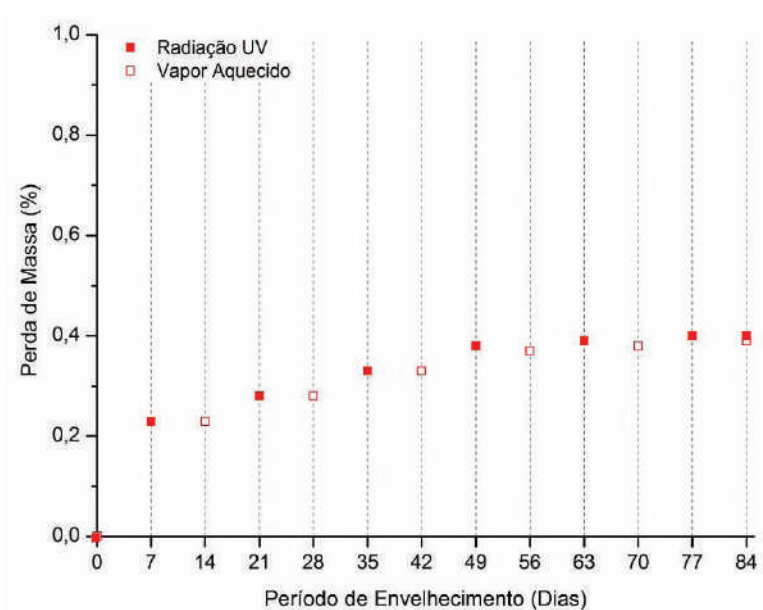


Figura 4.5. **RN+NPG** - Perda média de massa durante teste de envelhecimento acelerado.

Nas tabelas 4.4 e 4.5 são apresentados dados comparativos dos valores médios (percentuais) das perdas de massa referentes as primeiras e últimas pesagens, respectivamente para cada condição de estudo. Também são observadas suas respectivas dispersões, aqui determinada como a diferença absoluta entre os resultados obtidos.

Tabela 4.4. Perda percentual de massa do painel **RN+NPG** pós-irradiação ultravioleta.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO	PERDA DE MASSA (%)	DISPERSÃO (%)
<b>RN+NPG após 14 Dias</b>	0,23	4,3
<b>RN+NPG após 84 Dias</b>	0,40	7,3

Tabela 4.5. Perda percentual de massa do painel **RN+NPG** pós-vapor aquecido.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO	PERDA DE MASSA (%)	DISPERSÃO (%)
<b>RN+NPG após 07 Dias</b>	0,23	4,3
<b>RN+NPG após 84 Dias</b>	0,39	10,2

A resina náutica demonstrou um comportamento semelhante tanto na perda de massa pós-exposição à radiação UV, quanto pós-exposição ao vapor aquecido. Já na primeira pesagem após iniciado teste de envelhecimento acelerado, os corpos de prova apresentam uma perda média de 0,23% o que corresponde à cerca 60% da perda alcançada ao final do período total de exposição, em ambos os fatores climáticos.

Após o envelhecimento acelerado a resina náutica apresentou o processo da fotoxidação devido à radiação ultravioleta, caracterizado pela mudança cromática de um tom ocre da resina em estado original para um tom alaranjado originado pelo envelhecimento acelerado. Esse é visualizado no comparativo da figura 4.6 (a e b). Este processo já foi relatado em trabalhos por Rasch (1929), Feldman (2002) e Batterham e Rai, (2008).

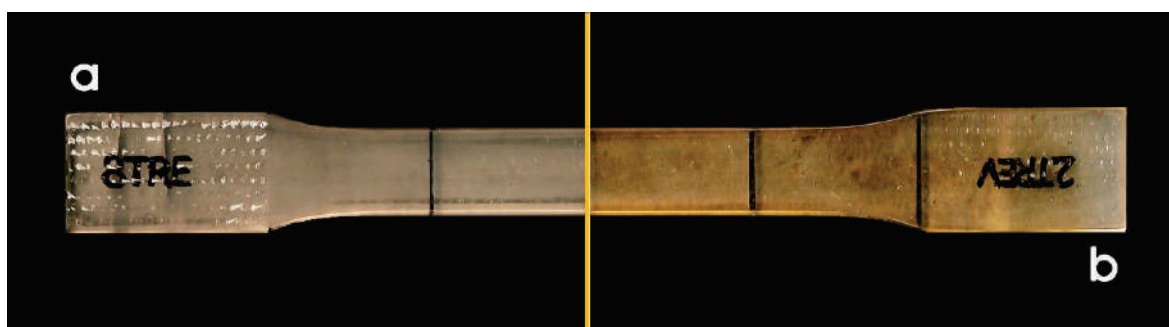


Figura 4.6. RN+NPG: a) Corpo de prova original; b) Corpo de prova envelhecido aceleradamente (efeito da fotoxidação).

Segundo Owen (1984) o mecanismo de degradação é executado em dois modos que ocorrem quase simultâneos: primeiro a descoloração ou amarelar da superfície e por último a perda da integridade mecânica. O primeiro modo é, em geral, o principal indicativo do desgaste pelo tempo de vida útil do material. A perda de propriedades mecânicas da resina quando envelhecida aceleradamente é elevada, Shokrieh e Bayat (2007) observaram uma perda de 22,9% das propriedades de tração da resina poliéster ortoftálica reforçada por fibra de vidro após serem expostas a 100h de radiação UV por câmara de envelhecimento de xênon da Atlas American Company.

O teste de envelhecimento adotado neste trabalho excede bastante as horas testadas por Shokrieh e Bayat (2007), o que, por conseguinte eleva a fragilidade da resina náutica, fato que justifica a não realização, neste estudo, de ensaios mecânicos nos corpos de prova envelhecidos.



## CAPÍTULO V

### 5 LAMINADO BJ - RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Neste capítulo são apresentados os aspectos macro e microestruturais do biocompósito na forma de laminado tanto no estado original (laminado **BJ**) quanto no estado envelhecido (laminado **BJ-E**), ou seja, após sofrer a influência dos fatores climáticos caracterizados como envelhecimento ambiental: radiação ultravioleta, temperatura e umidade.

Com relação às propriedades físicas, são apresentados os resultados dos ensaios de densidade volumétrica dos biocompósitos desenvolvidos.

Os desempenhos mecânicos nos ensaios de tração e compressão uniaxial, e flexão em três pontos, foram analisados a partir dos diagramas tensão versus deformação e tensão versus deflexão, respectivamente. Os dados sobre as resistências últimas à tração e compressão, tensão máxima na flexão, assim como os módulos de elasticidade estão dispostos em tabelas conjuntamente aos diagramas. Ressalta-se que para todos os ensaios realizados, os módulos de elasticidade foram medidos antes da carga de início do dano, uma variável dependente do tipo de carregamento e do biocompósito, de forma a evitar qualquer influência do dano nos resultados.

Ao apresentar o desempenho do laminado **BJ-E** será observada a deterioração por este sofrida decorrente da perda de massa relativa à exposição dos mesmos aos fatores climáticos, durante e após o teste de envelhecimento ambiental acelerado, além do processo de fotoxidação.

A análise e comparação entre os compósitos quanto à fratura mecânica, quanto aos desempenhos físicos e mecânicos apresentados e posteriores avaliações pós-envelhecimento ambiental acelerado serão apresentados ao final deste capítulo.

#### 5.1. Laminado BJ

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões referentes ao biocompósito no estado original (laminado **BJ**), ou seja, sem ser exposto a qualquer fator de envelhecimento.

### 5.1.1. Característica Microestrutural do Laminado BJ

A laminação manual utilizada para a fabricação do laminado **BJ** origina geralmente uma distribuição não uniforme entre reforço e resina, possibilitando um desalinhamento com relação à aplicação da carga, podendo influenciar nas propriedades mecânicas do compósito produzido.

A utilização de um único tipo de reforço neste compósito (tecido bidirecional de fibras de juta) teve por objetivo observar, posteriormente ao capítulo sétimo, qual a interferência da presença de um núcleo de resíduos de madeira ou núcleo híbrido na resposta final dos painéis **BMJ** e **BMJ-R**. Ressalta-se aqui que a resina **RN+NPG** foi utilizada com percentuais de catalisador e acelerador segundo recomendações do fabricante.

Ao iniciar a análise microestrutural do laminado **BJ** foram observadas presenças de defeitos de fabricação como bolhas, vazios e irregularidades, muitas delas perceptíveis em análise macroscópica tanto na superfície quanto internamente às camadas do laminado, como visto na figura 5.1.

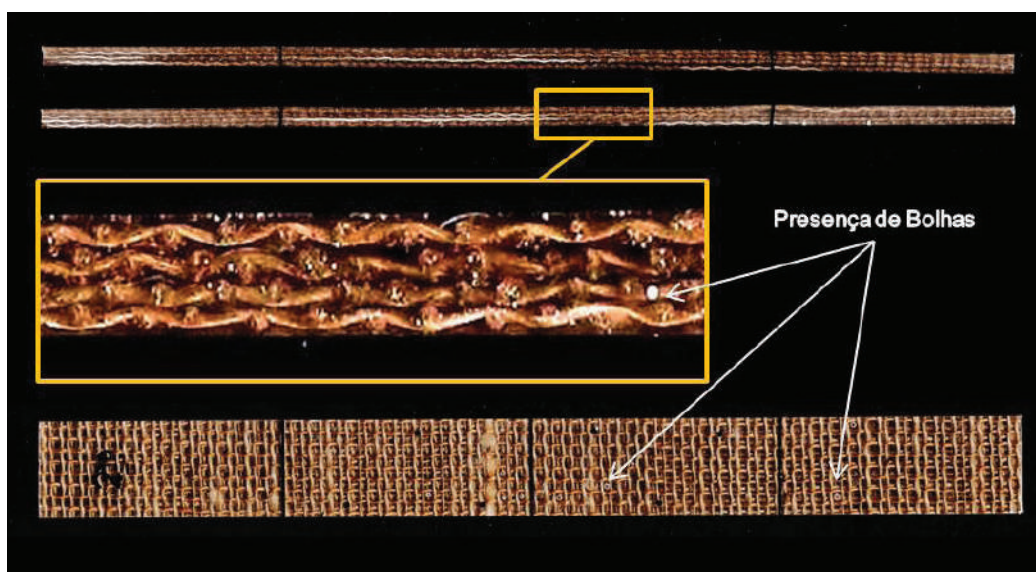


Figura 5.1. Laminado **BJ** – Macroestrutura dos corpos de prova de tração.

Na figura 5.2 é mostrada a seção longitudinal (espessura do corpo de prova) do laminado **BJ**, obtida com imagem de microscopia óptica. Na mesma pode-se visualizar a distribuição espacial das camadas de tecido de juta e das regiões ricas em resina.

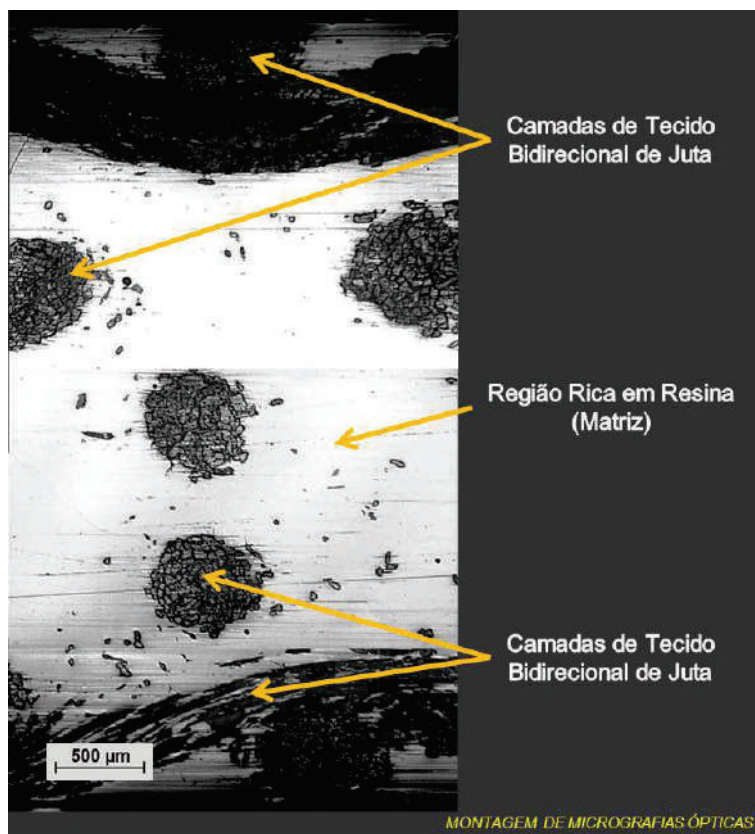


Figura 5.2. Microestrutura do Laminado **BJ** - Seção longitudinal.

### 5.1.2. Ensaio de Densidade Volumétrica

A densidade volumétrica média do laminado **BJ** e bem como sua dispersão estão apresentadas na tabela 5.1. A dispersão apresentada pelo material foi bastante reduzida. A mesma foi determinada como a diferença absoluta entre os valores máximo e mínimo obtidos.

Tabela 5.1. Densidade volumétrica média do laminado **BJ**.

MATERIAL	VALOR MÉDIO (g/cm <sup>3</sup> )	DISPERSÃO (%)
Laminado BJ	1,18	0,6

A medição da densidade volumétrica permite os cálculos da resistência e do módulo de elasticidade específicos dos biocompósitos desenvolvidos, o que permite sua comparação com outros materiais não convencionais, de uso comum e com semelhante tipo de aplicação planejada para uso do laminado **BJ**.

### 5.1.3. Laminado BJ – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial

O diagrama a seguir de tensão versus deformação do laminado **BJ** no estado original obtido no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 5.3.

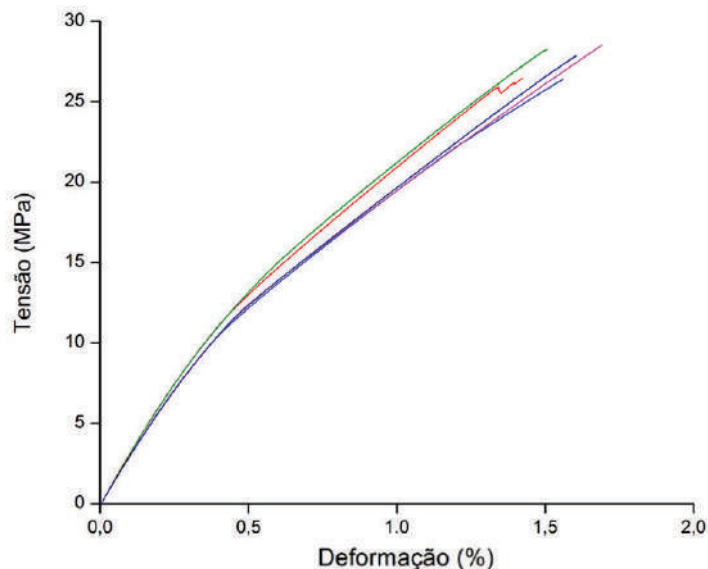


Figura 5.3. Diagrama tensão versus deformação do Laminado **BJ** na tração uniaxial.

Em análise do diagrama, pode-se observar que o laminado, antes de alcançar a metade da tensão máxima, ou seja, pouco depois de 10 MPa, passa por uma mudança de módulo elástico, decorrente do início do processo de dano, com leve aumento na dispersão, que apesar disto, manteve-se baixa.

Na tabela 5.2 constam os resultados obtidos com os valores médios de tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa) e deformação de ruptura (%); além dos valores de suas respectivas dispersões percentuais. Lembrando que em todos os ensaios realizados para o laminado **BJ**, os valores do módulo de elasticidade foram determinados antes da carga de início do dano e na direção de aplicação da carga. Os valores das dispersões correspondem à diferença absoluta dos resultados obtidos.

Tabela 5.2. Propriedades mecânicas do laminado **BJ** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	27,50	3,7
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,71	3,3
Deformação de Ruptura (%)	1,55	9,0

Observa-se na tabela 5.2 que os valores da dispersão são considerados baixos em se tratando de compósitos a base unicamente de fibras naturais. Isso mostra que para o caso da tração uniaxial o laminado **BJ** apresenta um comportamento uniforme até a fratura.

#### 5.1.4. Análise da Fratura do Laminado **BJ** na Tração Uniaxial

Na figura 4.4 são apresentados dois corpos de prova após ensaio do laminado **BJ**. Observa-se nestes a ocorrência de fratura bastante localizada e perpendicular à direção da aplicação da carga. Todos os corpos de prova apresentaram uma fratura frágil final do tipo **LGM** (fratura lateral na região mediana do galgo), segundo classificação adotada pela norma ASTM D 3039-08. Foram observados rasgamentos das camadas de tecido de fibras de juta, decorrentes da separação mecânica das seções de fratura após o ensaio.

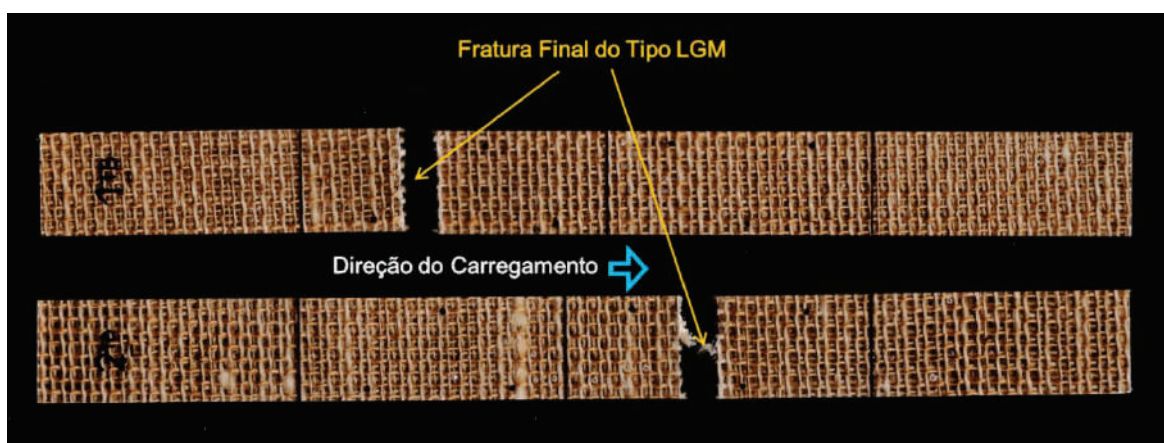


Figura 5.4. Laminado **BJ** - Característica da fratura na tração uniaxial.

Na figura 5.5, mostra-se em detalhe a seção de fratura final a qual não apresentou um desenho irregular entre as camadas de tecido de fibras de juta, apesar do rasgamento do tecido de reforço. As falhas oriundas do processo de fabricação, como por exemplo, bolhas e vazios presentes não tiveram qualquer interferência na formação do dano.

Na análise micrográfica da fratura no laminado **BJ**, (ver figura 5.6), constata-se a presença dos tipos de danos mais comuns nos plásticos reforçados, como as microfissuras transversais ao carregamento, fratura adesiva interna às camadas de fibras de juta, bem como ruptura de fibras na região de fratura final.

Ressalta-se, porém, que não foram registrados danos como a delaminação e fratura coesiva na fibra. Embora haja uma concentração de fissuras na região de fratura final, algumas foram detectadas em regiões mais distantes com relação à fratura final, porém em menor intensidade.



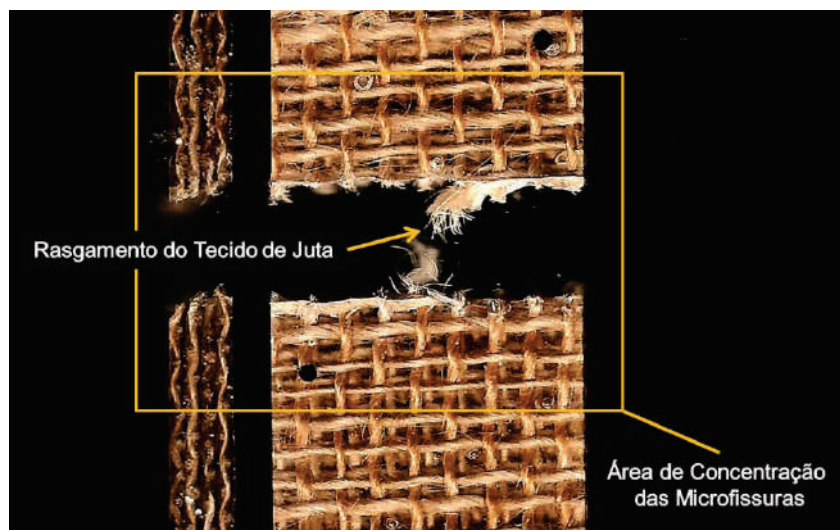


Figura 5.5. Laminado **BJ** – Área de concentração de microfissuras no ensaio de tração uniaxial.

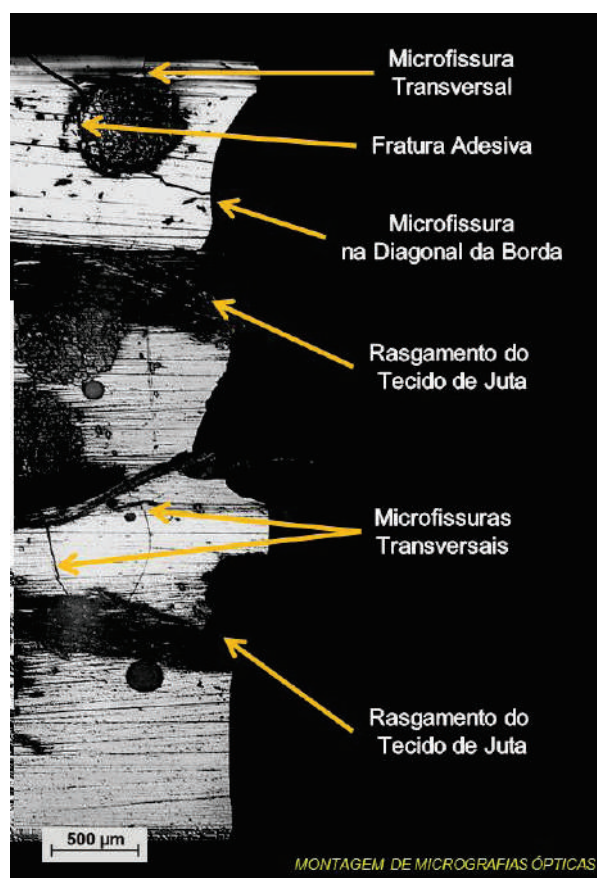


Figura 5.6. Laminado **BJ** – Região da fratura final na tração uniaxial.

Na figura 5.7a é ilustrada uma microfissura transversal propagada em região rica em resina (fratura coesiva na matriz) e nucleada ao atingir a mecha no tecido de fibras de juta. Já em outras regiões as fissuras em seu processo de propagação penetram nas mechas originando o processo de descolamento dos filamentos na resina, também denominado de fratura adesiva, conforme figura 5.7b.



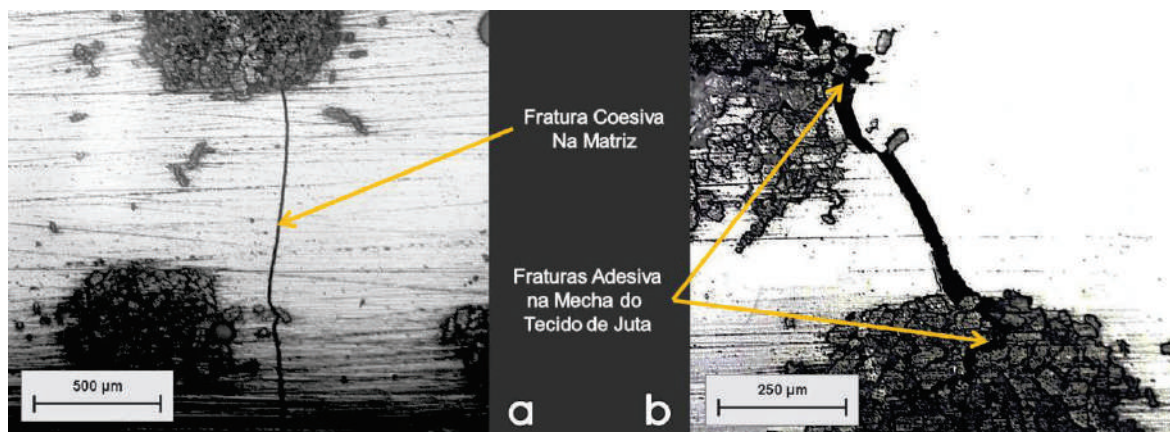


Figura 5.7. Laminado **BJ** na tração uniaxial: a) Microfissura transversal; b) Fraturas adesivas em mechas do tecido de juta.

### 5.1.5. Laminado BJ – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos

Na figura 4.8 apresenta-se o diagrama de tensão versus deflexão do laminado **BJ** obtido no ensaio de flexão em três pontos. Para esse tipo de ensaio o material apresenta um comportamento entre a tensão e a deflexão que pode ser considerado linear até valores de tensão bem próximos aos da fratura final.

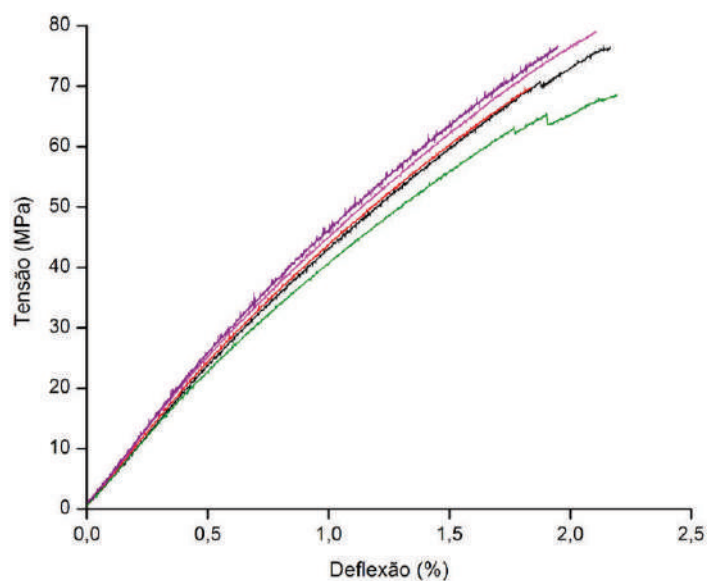


Figura 5.8. Diagrama de tensão versus deflexão do Laminado **BJ**.

Os resultados obtidos com os valores médios de tensão de flexão (MPa), módulo de elasticidade na flexão (GPa) e da deflexão máxima do laminado **BJ**, com suas respectivas dispersões são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3. Propriedades mecânicas do laminado **BJ** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão de Flexão (MPa)	75,54	4,6
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,47	5,6
Deflexão Máxima (%)	2,00	8,0

Os valores de dispersão de tensão e de módulo apresentaram-se dentro de valores normais, contudo os picos originados durante a aplicação da carga e já próximos à fratura final elevaram a dispersão na deflexão do laminado **BJ**.

#### 5.1.6. Análise da Fratura do Laminado **BJ** na Flexão em Três Pontos

O laminado **BJ** apresentou na flexão em três pontos um modo de fratura característico a esse tipo de carregamento, ou seja, com fratura inicial na camada tracionada do corpo de prova, como mostra a figura 5.9. Macroscopicamente é possível visualizar que a fissura formada nessa camada se ramifica em sua propagação em direção à linha neutra (em azul).

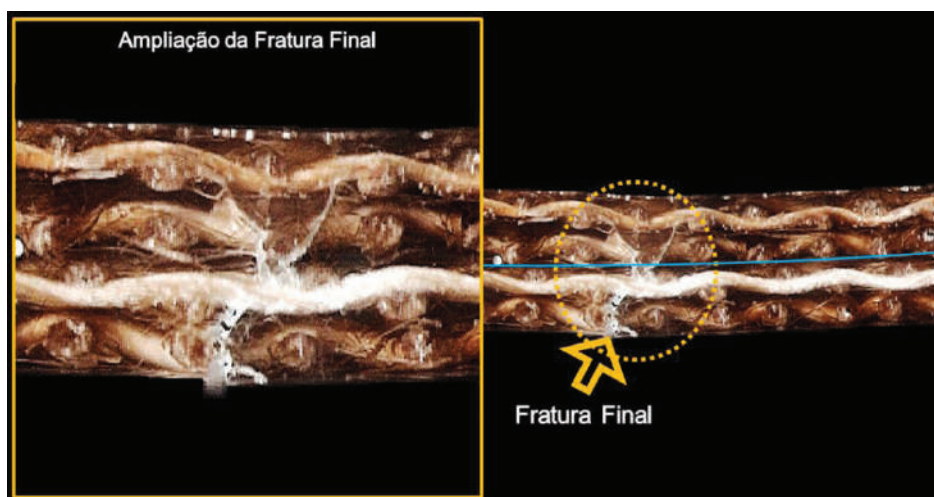


Figura 5.9. Laminado **BJ** - Seção longitudinal com ampliação da fratura final na flexão em três pontos.

Em muitos corpos de prova ensaiados são observados danos na matriz, sem que haja estreita relação com a presença de falhas oriundas do processo de fabricação. O encontro das fendas com o tecido bidirecional de fibras de juta parece redirecionar a fratura (fig. 5.10 e 5.12). Entretanto, na região rica em resina ocorrem fissuras transversais e irregularidades, semelhantes às presentes em compósitos laminados com fibras cruzadas

(Lim *et al.*, 1998), possivelmente devido ao deslocamento irregular da fenda ao longo das camadas durante o ensaio.

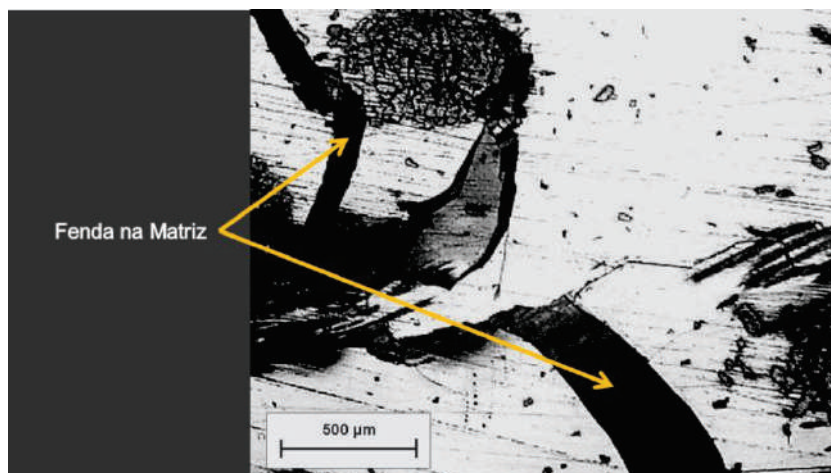


Figura 5.10 Laminado **BJ** – Fenda em região rica em resina na flexão em três pontos.

Na flexão em três pontos, o laminado **BJ** concentra de modo considerável os danos na região tracionada, sem que seja observada ao longo dos corpos de prova analisados a presença de microfissurações relevantes na última camada de tecido de reforço submetida à compressão. A fratura final, como já comentado, forma bifurcações (fig. 5.11) ou ramificações (fig. 5.12), notadamente entre a segunda e terceira camada de tecido, contadas a partir da região tracionada.

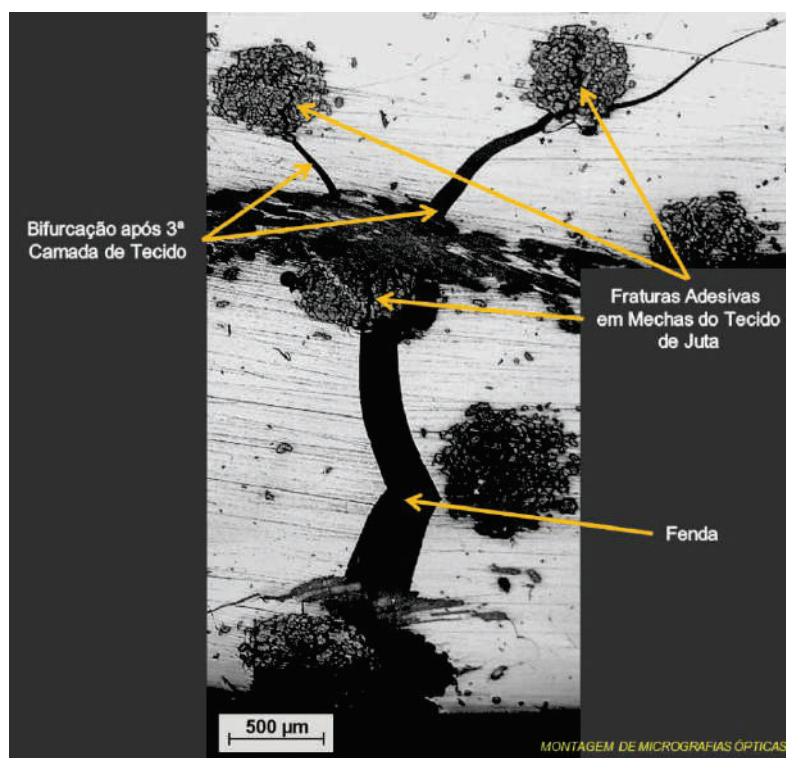


Figura 5.11 Laminado **BJ** – Característica da fratura final na flexão em três pontos.



Na análise microscópica da fratura obtida através do MEV, pode-se visualizar a formação e propagação do dano ao longo da espessura do corpo de prova, com destaque para a presença de ruptura de fibras internas à camada tracionada, conforme em detalhe ampliado na figura 5.12.

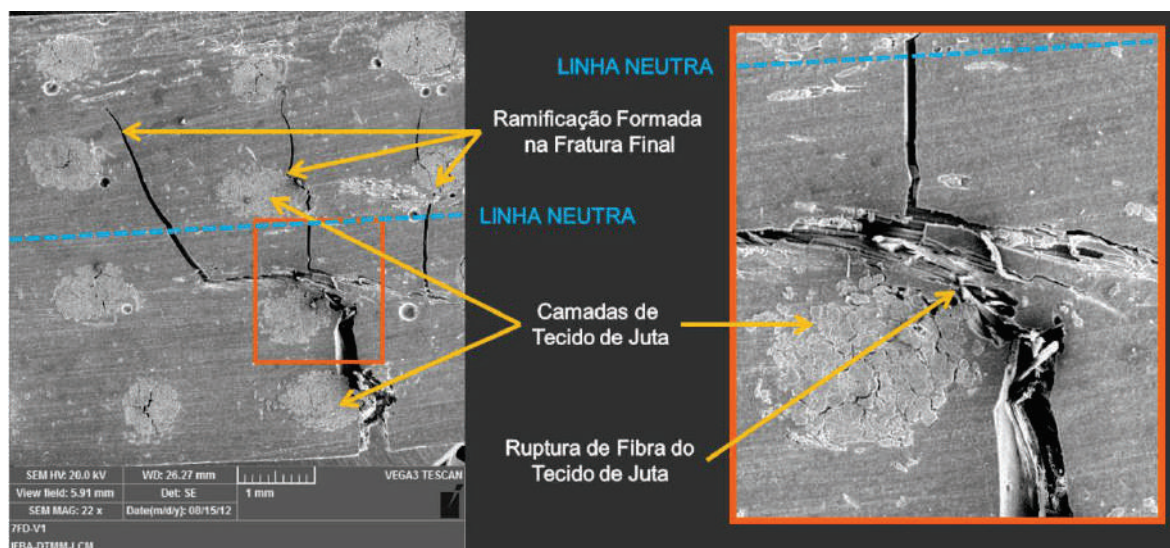


Figura 5.12 Laminado **BJ** - MEV de Fratura ramificada na flexão em três pontos.

#### 5.1.7. Laminado **BJ** – Desempenho Mecânico na Compressão Uniaxial

O diagrama de tensão versus deformação do laminado **BJ** obtido no ensaio de compressão uniaxial está apresentado na figura 5.13.

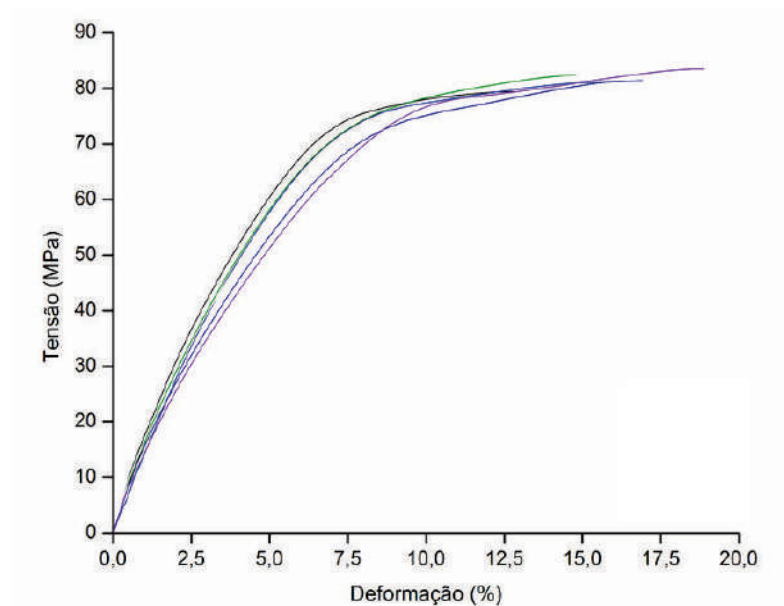


Figura 5.13. Diagrama de tensão versus deformação do laminado **BJ** na compressão uniaxial.

A deformação máxima ocorrida antes da ruptura foi, possivelmente, originada pelo comportamento do processo de fratura, que apresentou um dano prolongado e intenso ocorrido internamente às camadas de reforço, que foi observado ao final do ensaio no laminado **BJ**. Esse processo de deformação com reduzida variação da tensão (semelhante ao processo de fluência nos materiais dúcteis) parece iniciar após os 70 MPa, quando nota-se uma mudança no comportamento do perfil do diagrama de tensão versus deformação.

Os resultados obtidos com os valores médios da tensão última (MPa), módulo de elasticidade (GPa) longitudinal (medido na direção de aplicação da carga) e da deformação de ruptura, com suas respectivas dispersões são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4. Propriedades mecânicas do painel **BMJ** na compressão uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	81,58	2,3
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,70	17,6
Deformação de Ruptura (%)	15,9	18,2

Durante o acompanhamento do ensaio, foi observado que os corpos de prova começam a apresentar modificações estruturais, que refletiram no módulo de elasticidade após a carga de início de dano (30 MPa), que calculado a partir da carga de início do dano apresentou uma maior dispersão do que a observada nos biocompósitos laminados, já estudados, o mesmo não ocorreu com a tensão máxima.

#### 5.1.8. Análise da Fratura do Laminado BJ na Compressão Uniaxial

A característica da fratura do laminado **BJ** na compressão uniaxial foi a de fratura por cisalhamento. Essa característica de fratura também foi detectada no trabalho de Freire Jr. (2001) apesar do mesmo tratar-se de compósitos reforçados com fibras de vidro, porém com tecidos de reforço também do tipo bidirecional. Esta fratura é mais bem visualizada através da figura 5.14.

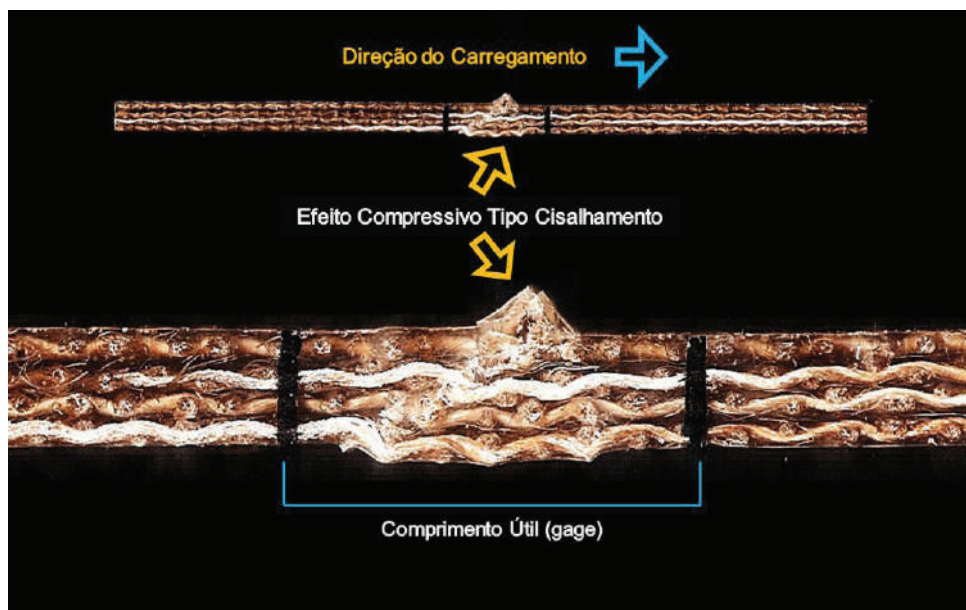


Figura 5.14. Laminado **BJ** – Característica da fratura na seção longitudinal - Compressão uniaxial.

O desalinhamento das camadas na falha por cisalhamento originou perfurações internas bem como a formação de fendas, como é possível visualizar nas figuras 5.15 e 5.16, respectivamente.

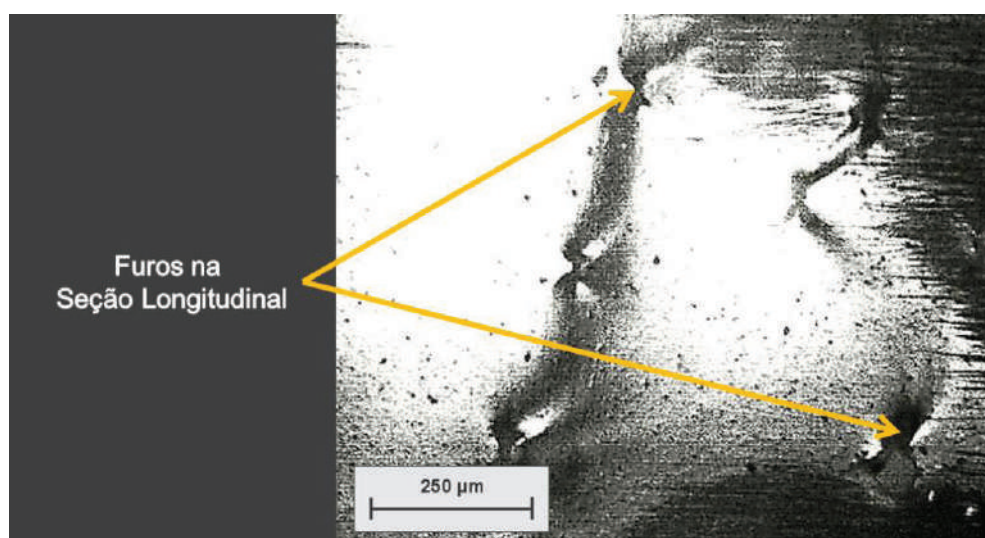


Figura 5.15. Laminado **BJ** – Presença de furos na região fraturada na compressão.

A configuração definida para o laminado **BJ** constituída por todas as camadas do mesmo tipo de tecido de reforço, não apresentou altas tensões interlaminares e por consequência a ausência da delaminação.



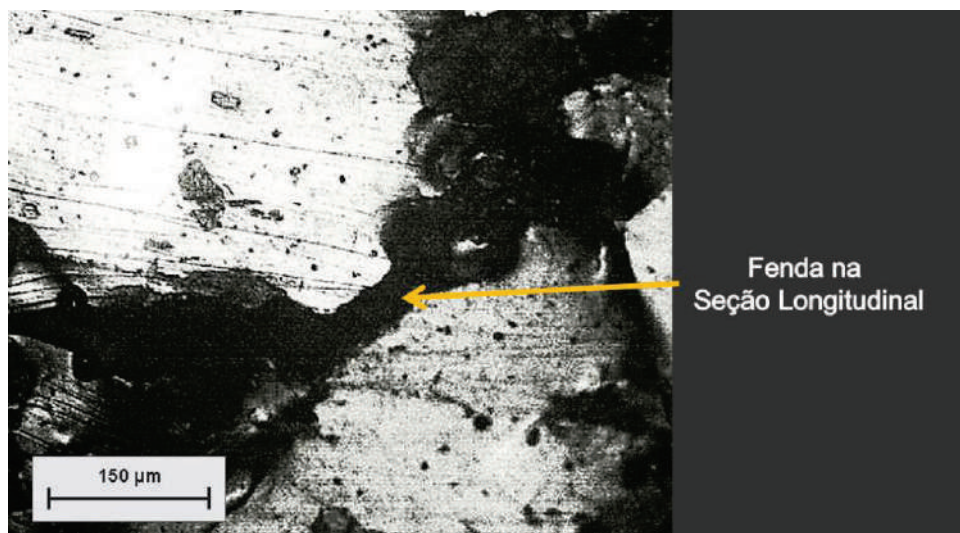


Figura 5.16. Laminado **BJ** – Presença de fendas na região fraturada na compressão.

No entanto, quando observado na análise micrográfica por meio da microscopia eletrônica de varredura é possível identificar a formação de fendas longitudinais intralaminares nas camadas de tecido bidirecional de juta e onde se pode visualizar a ruptura de fibras de juta, ver figura 5.17.

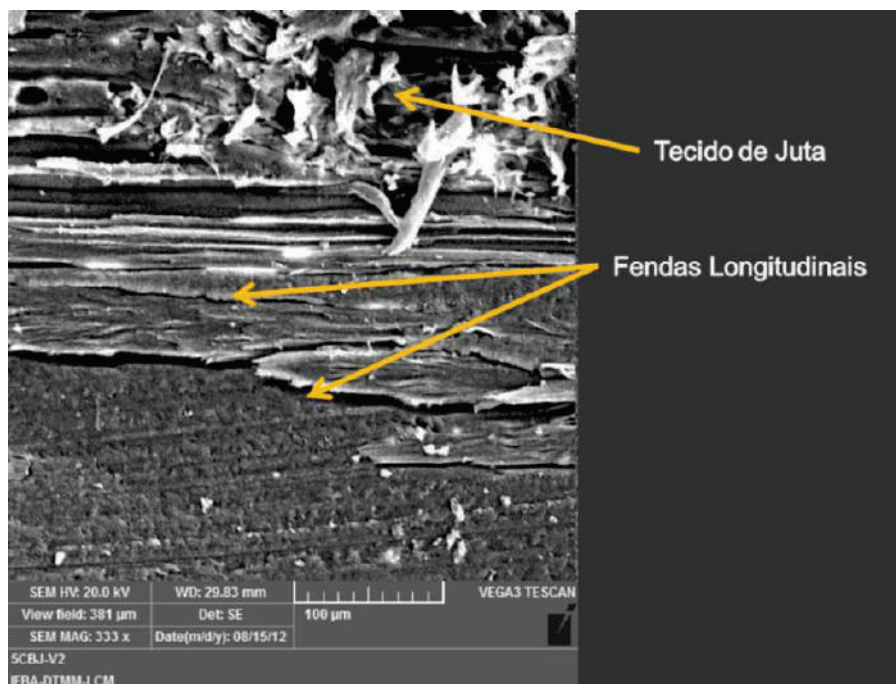


Figura 5.17. Laminado **BJ** - MEV da seção transversal do corpo de prova na compressão uniaxial.

## 5.2. Laminado BJ-E

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões referentes ao biocompósito laminado **BJ** após o mesmo ser exposto aos fatores climáticos do envelhecimento ambiental acelerado.

### 5.2.1. Característica Macroestrutural do Laminado BJ-E - Fotoxidação

Os corpos de prova do laminado **BJ-E** demonstraram um gradual escurecimento da face exposta aos fatores climáticos, perceptíveis a partir de quarenta dias de exposição. A mudança cromática do material pode ser observada na figura 5.18 (a, b e c), tanto na face envelhecida, quanto na seção transversal, onde as camadas de tecido bidirecional de juta ficaram com uma tonalidade mais alaranjada, se comparado as da região oposta, ou seja, não exposta aos fatores climáticos do teste. Esse fenômeno é denominado de fotoxidação do material. Ressalta-se aqui que a profundidade de ataque do processo de envelhecimento atinge pelo menos metade da espessura do corpo de prova.

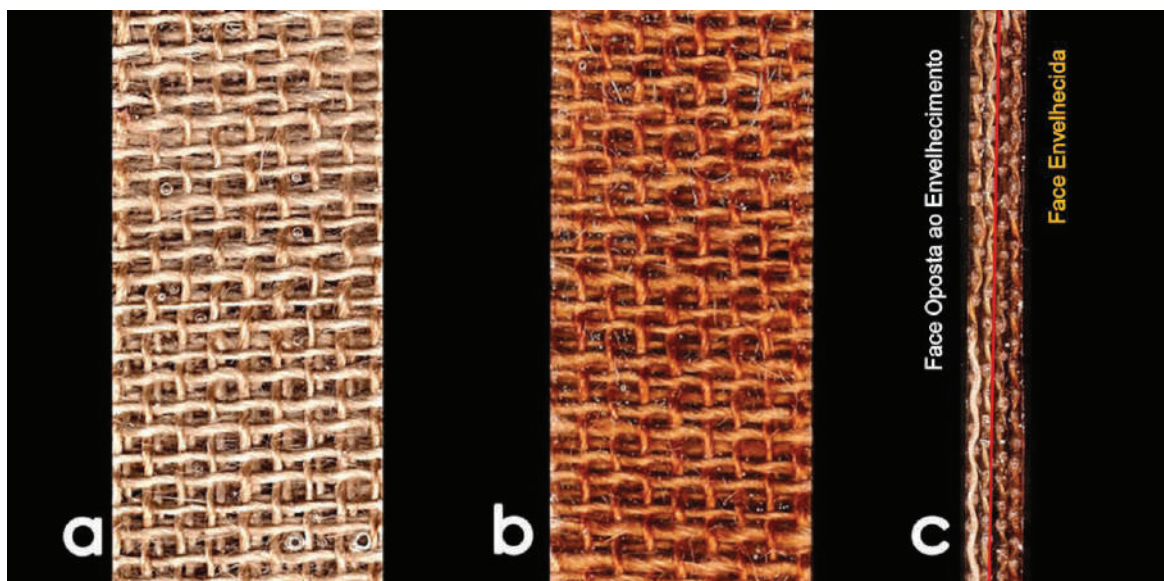


Figura 5.18. Fotoxidação do Laminado **BJ-E**: a) Face oposta ao envelhecimento, b) Face envelhecida e c) Espessura do CP envelhecido.

A face envelhecida do laminado **BJ-E** apresentou um maior desgaste no tecido de juta, com um esgarçamento da trama, assim como um aumento na formação de bolhas e furos superficiais ocasionados pela perda de massa durante o envelhecimento acelerado que atinge mais agressivamente a camada mais externa do material (fig. 5.19b).



O efeito é caracterizado pelos pontos brancos observados. As fendas e danos formados na superfície da face exposta ao envelhecimento podem ser mais bem observados através dos comparativos: análise macroscópica na figura 5.19 (a e b) e microscópica óptica da figura 5.20 (a e b).

Na análise a partir da microscopia eletrônica de varredura, figura 5.21 (a e b), observa-se no interior dos furos a presença de ruptura de fibras (micrografia em detalhe, figura 5.21c) e bem como uma microfissuração intensa na matriz, porém sem ocasionar a desaderência na interface fibra/matriz, um fenômeno sempre presente de forma intensa, nos compósitos à base de resina poliéster e fibras sintéticas quando submetidas ao mesmo processo de envelhecimento ambiental estudado aqui, como se observa na figura 5.22 (a, b e c) (Felipe R., 2012).

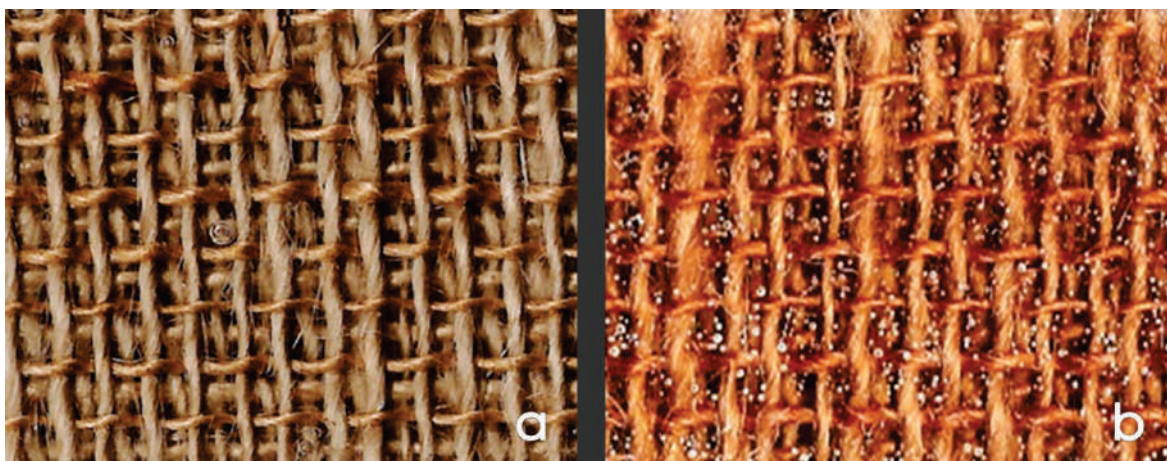


Figura 5.19. Imagem macro do Laminado **BJ-E**: a) Face oposta ao envelhecimento; b) Face envelhecida.

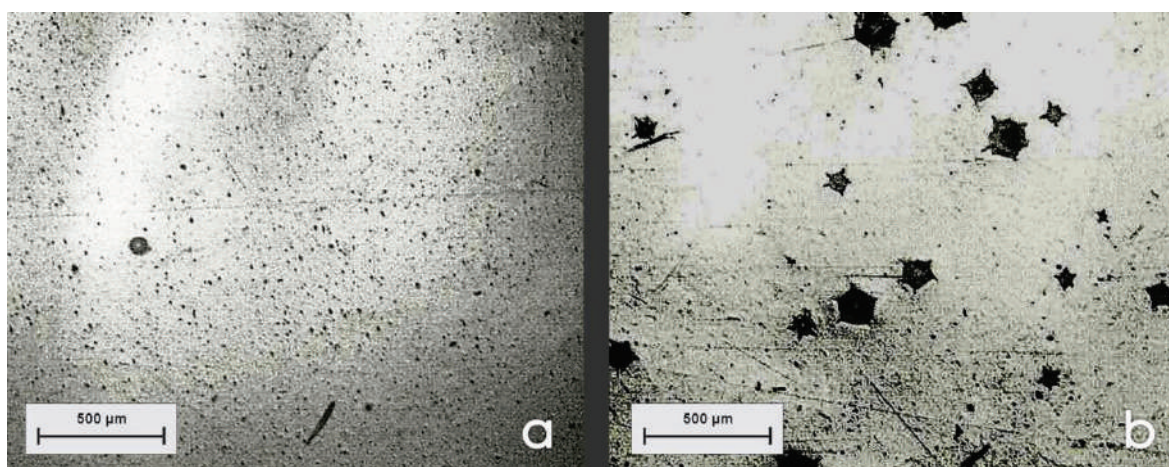


Figura 5.20. Imagem óptica do Laminado **BJ-E**: a) Face oposta ao envelhecimento; b) Face envelhecida com presença de furos.



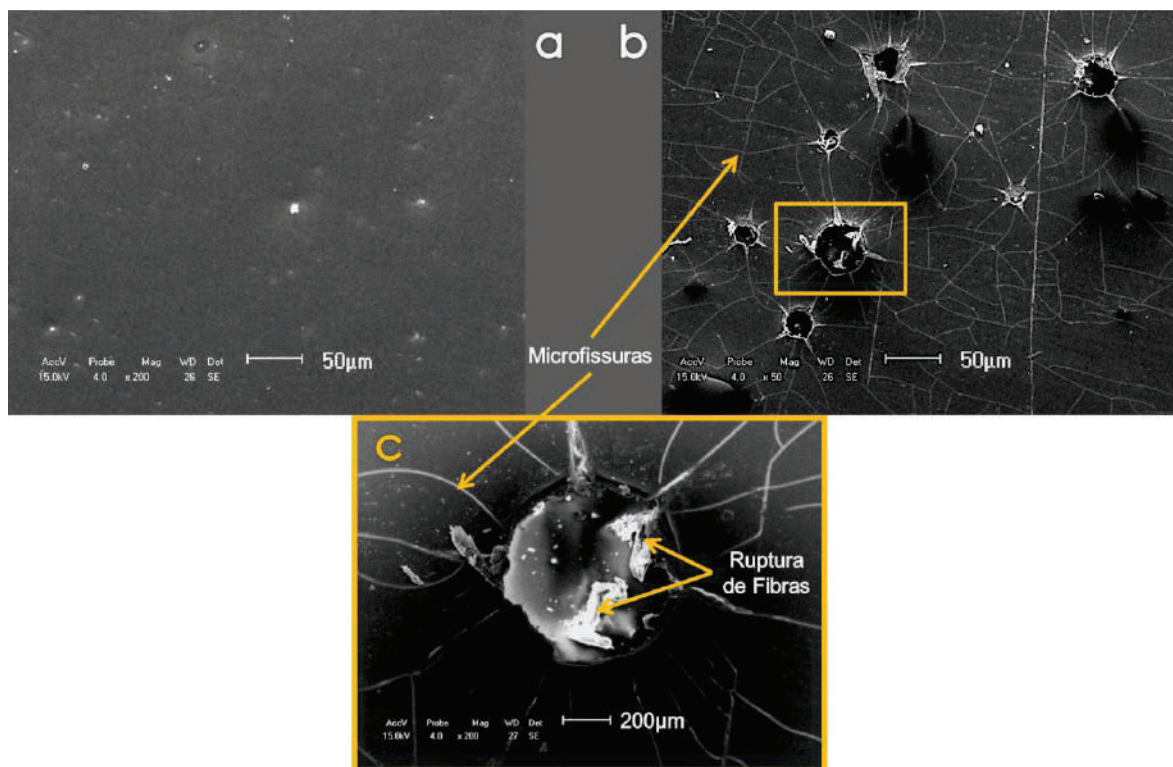


Figura 5.21. MEV do Laminado **BJ-E**: a) face oposta ao envelhecimento; b) face envelhecida; c) detalhe de furo na face envelhecida.

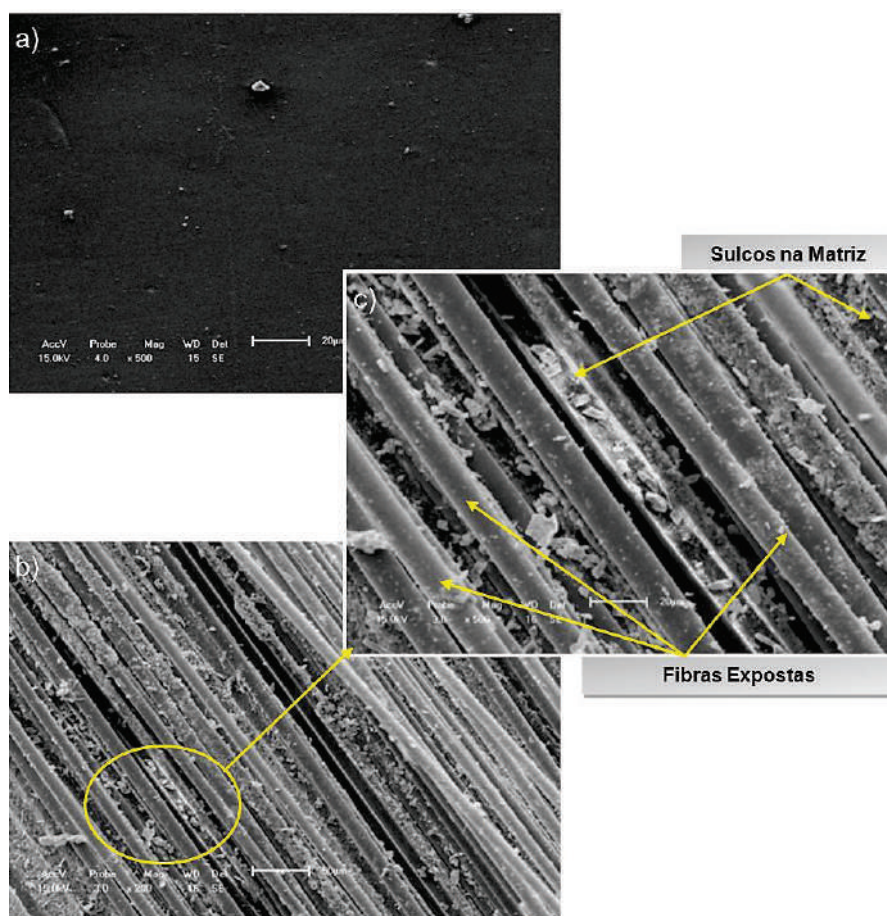


Figura 5.22. Compósito de resina poliéster/fibra de vidro: a) face oposta ao envelhecimento; b) face envelhecida; c) detalhe da face envelhecida (Felipe R., 2012).

### 5.2.2. Deterioração por Perda de Massa do Laminado BJ-E

Na análise comparativa dos resultados após a exposição à radiação UV e ao vapor aquecido, pode ser observado que os valores de perda de massa do laminado **BJ**, ao longo do processo de envelhecimento, mantiveram-se muito aproximados, ou seja, realizar as medidas após exposição nos diferentes ciclos, não influenciou o comportamento do material demonstrando uma relativa regularidade no processo da perda de massa.

Os percentuais de perda de massa do laminado **BJ-E** frente às exposições de radiação UV e vapor aquecido estão apresentados na figura 5.23.

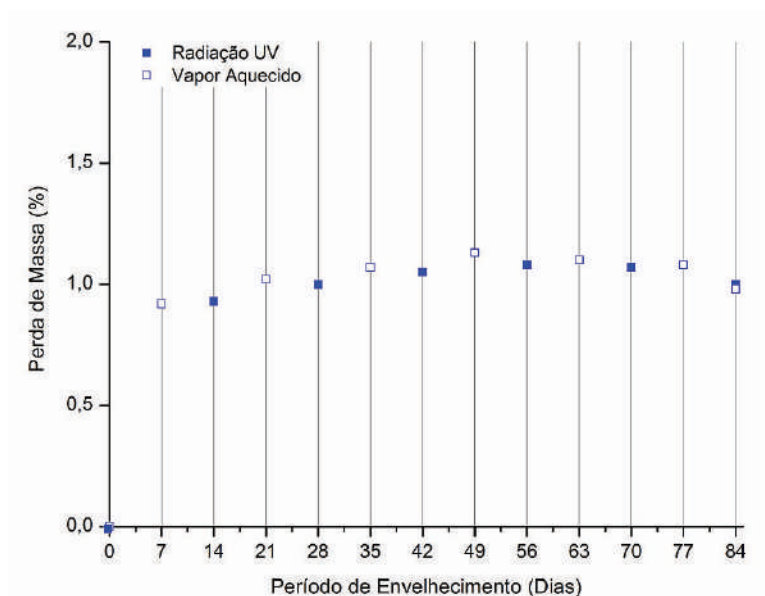


Figura 5.23. Laminado **BJ-E** - Perda média de massa durante teste de envelhecimento acelerado.

Nas primeiras pesagens, medidas realizadas tanto após a exposição ao vapor aquecido quanto aos raios UV, foi registrada uma perda média de 0,92% o que corresponde a quase toda a perda de massa alcançada ao final do teste. Durante o envelhecimento a perda média manteve sem oscilações relevantes, como observado nas tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5. Perda percentual de massa do laminado **BJ-E** pós-irradiação ultravioleta.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO	PERDA DE MASSA (%)	DISPERSÃO (%)
BJ-E Envelhecido 07 Dias	0,93	4,3
BJ-E Envelhecido 84 Dias	1,00	5,0

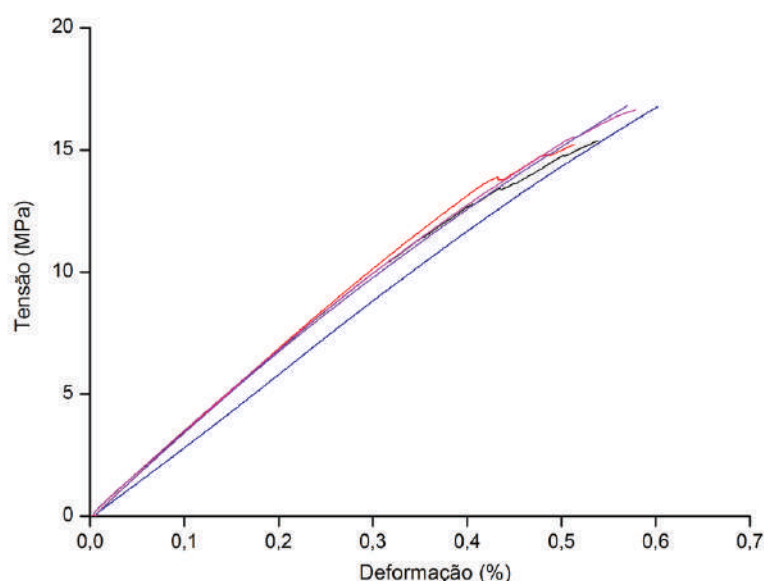
Tabela 5.6. Perda percentual de massa do laminado **BJ-E** pós-vapor aquecido.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO	PERDA DE MASSA (%)	DISPERSÃO (%)
<b>BJ-E Envelhecido 07 Dias</b>	0,92	1,0
<b>BJ-E Envelhecido 84 Dias</b>	0,98	4,0

A pequena variação na perda de massa ocorrida no caso de exposição ao vapor aquecido entre o 21° e 77° dias de teste é resultado do processo de “inchamento” sofrido pela propriedade hidrofílica das fibras naturais, apontado por Feldman (2002) o que pode levar a resultados menos precisos em termos da real instabilidade dimensional ocorrida nos biocompósitos.

### 5.2.3. Laminado BJ-E – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial

O diagrama de tensão versus deformação do laminado **BJ-E** obtido no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 5.24.

Figura 5.24. Diagrama de tensão versus deformação do Laminado **BJ-E** na tração uniaxial.

O laminado **BJ-E** demonstrou um comportamento característico de material frágil, e diferente do laminado no estado original, ou seja, o mesmo não apresentou uma variação de inclinação nas curvas tensão versus deformação, caracterizada pela mudança no módulo de elasticidade devido ao início do dano.



Na tabela 5.7 mostram-se os resultados obtidos com os valores médios de tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa) e deformação de ruptura (%); além dos valores de suas respectivas dispersões.

Tabela 5.7. Propriedades mecânicas do laminado **BJ-E** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	16,40	2,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,23	5,5
Deformação de Ruptura (%)	0,56	7,1

Apesar do desgaste do processo de aceleração do envelhecimento ambiental, o laminado manteve uma moderadamente baixa dispersão no módulo e bem como na deformação de ruptura, repetindo a reduzida dispersão na tensão, como já observado em ensaios anteriores.

#### 5.2.4. Análise da Fratura do Laminado BJ-E na Tração Uniaxial

O laminado **BJ-E** manteve o mesmo modo de fratura final localizada do tipo LGM (ASTM D 3039-08), já observado no laminado em estado original. Na figura 5.25 ilustra-se este comportamento característico da fragilidade na fratura do material.

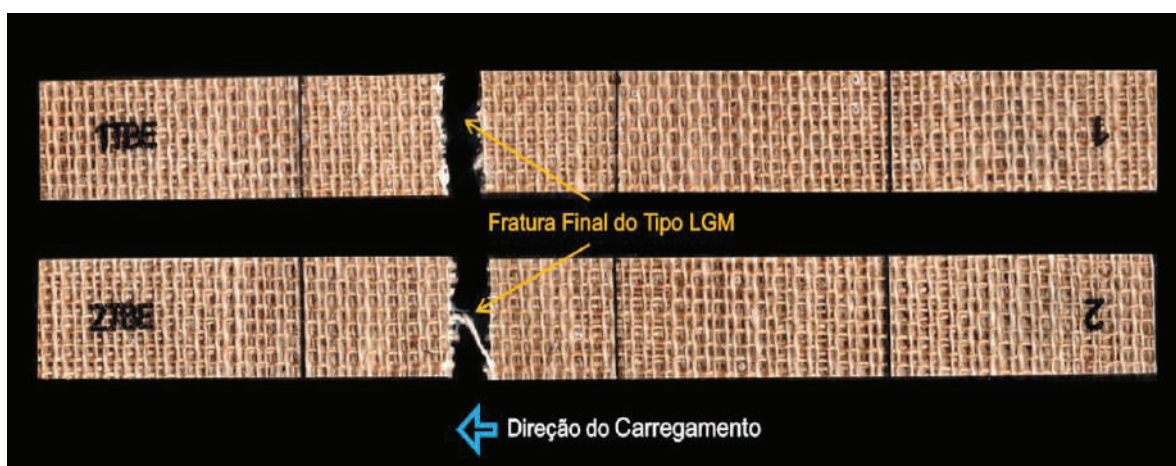


Figura 5.25. Laminado **BJ-E** – Corpos de prova ensaiados na tração uniaxial.

Na fratura do laminado **BJ-E** observam-se os mesmos rasgamentos das camadas de tecido de juta, comentados quanto à fratura do laminado **BJ**. A região de fratura final apresentou-se bastante regular (fig. 5.26), com a formação de poucas microfissuras e sem

demonstrar diferenças entre a região mais afetada pelo envelhecimento em relação à face oposta ao envelhecimento.

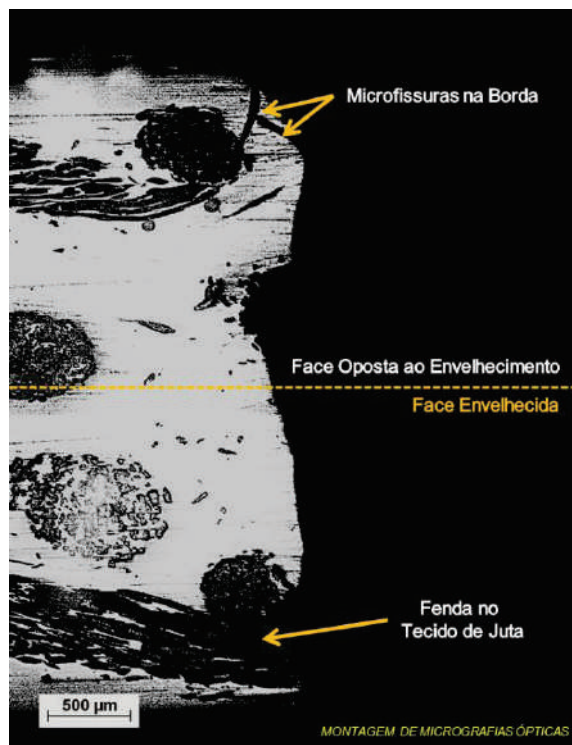


Figura 5.26. Laminado **BJ-E** - Fratura final na tração uniaxial.

No processo de propagação das microfissuras, fora da região de fratura final, o mesmo mostra as mesmas se propagando tanto na resina, caracterizando fratura do tipo coesiva na matriz, quanto contornando as mechas do tecido de juta, com isto originando a fratura do tipo adesiva. Um destes exemplos está ilustrado na figura 5.27.

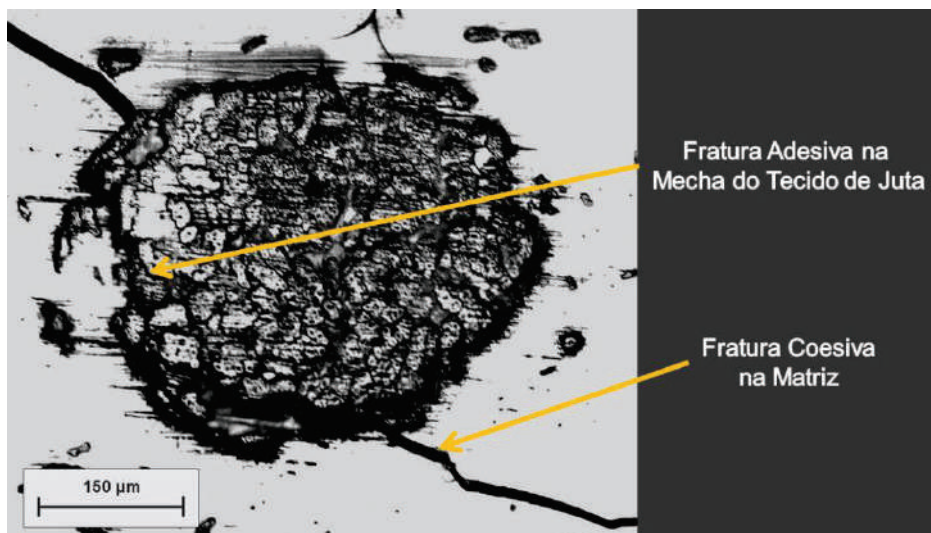


Figura 5.27. Laminado **BJ-E** – Microfissura na região de fratura final na tração uniaxial.

O rasgamento mecânico do tecido de juta ocorrido ao final dos ensaios resultou na presença de furos na matriz. Este dano é característico da fratura adesiva, devido à desaderência que ocorre na interface entre a fibra e a matriz observado na figura 5.28.

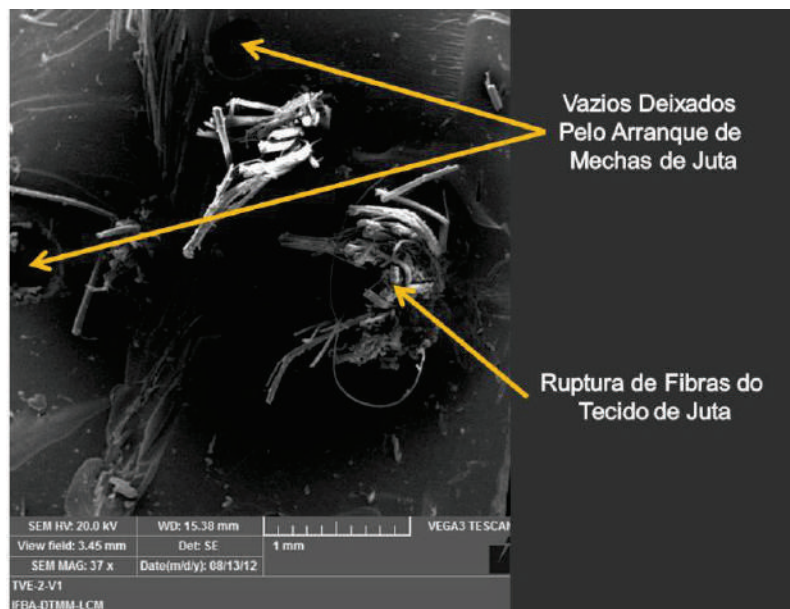


Figura 5.28. Laminado **BJ-E** – Rupturas de fibras na tração uniaxial.

#### 5.2.5. Laminado BJ-E – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos

O laminado **BJ-E** demonstrou maior dispersão dos resultados quando comparado ao laminado em estado original, principalmente após iniciado o processo de fratura, antes da metade da tensão máxima, como se observa no diagrama da figura 5.29.

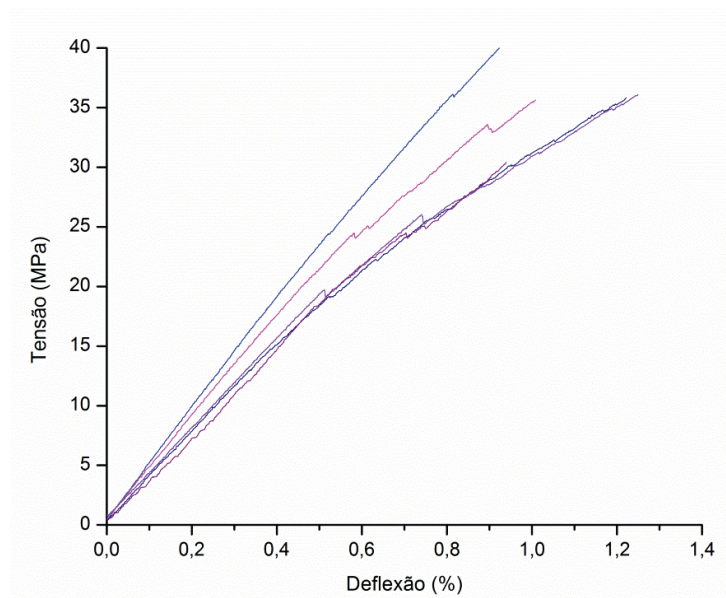


Figura 5.29. Diagrama de tensão versus deflexão do Laminado **BJ-E**.

As irregularidades observadas no perfil das curvas do laminado podem ser resultado da deterioração tanto da resina quanto das fibras de juta provenientes do processo de envelhecimento, e situadas na superfície tracionada dos corpos de prova.

Os resultados obtidos com os valores médios de tensão de flexão máxima (MPa), módulo de elasticidade na flexão (GPa) e da deflexão máxima, com suas respectivas dispersões são apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8. Propriedades mecânicas do laminado **BJ-E** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	37,00	9,8
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,98	14,3
Deflexão Máxima (%)	1,00	24,0

O maior desgaste observado no ensaio de flexão aumentou a dispersão do material, sobretudo quanto à deflexão máxima, que não repetiu o perfil uniforme do diagrama apresentado pelo material em estado original.

#### 5.2.6. Análise da Fratura do Laminado BJ-E na Flexão em Três Pontos

Neste ensaio o laminado **BJ-E** apresentou uma fratura característica dos laminados submetidos à flexão em três pontos, ou seja, com início na camada tracionada e propagação entre as camadas de reforço na direção da região comprimida. Ressalta-se ainda uma maior presença de microfissuras ao longo da região envelhecida e tracionada, como se observa na figura 5.30.



Figura 5.30. Laminado **BJ-E** – Seção longitudinal na flexão em três pontos.



A análise microscópica da fratura final do laminado envelhecido aceleradamente demonstra que o dano muda levemente de direção no encontro com as camadas de tecido de juta. As bifurcações na região comprimida ocorrem com reduzida extensão. É importante salientar que não se percebe mudanças significativas entre a região oposta ao envelhecimento e a região envelhecida, ver figura 5.31.

Na figura 5.32 mostra-se, em detalhe, que na propagação das fendas na camada tracionada do laminado **BJ-E**, a mesma provoca fratura do tipo adesiva no interior das mechas do tecido de fibras de juta.

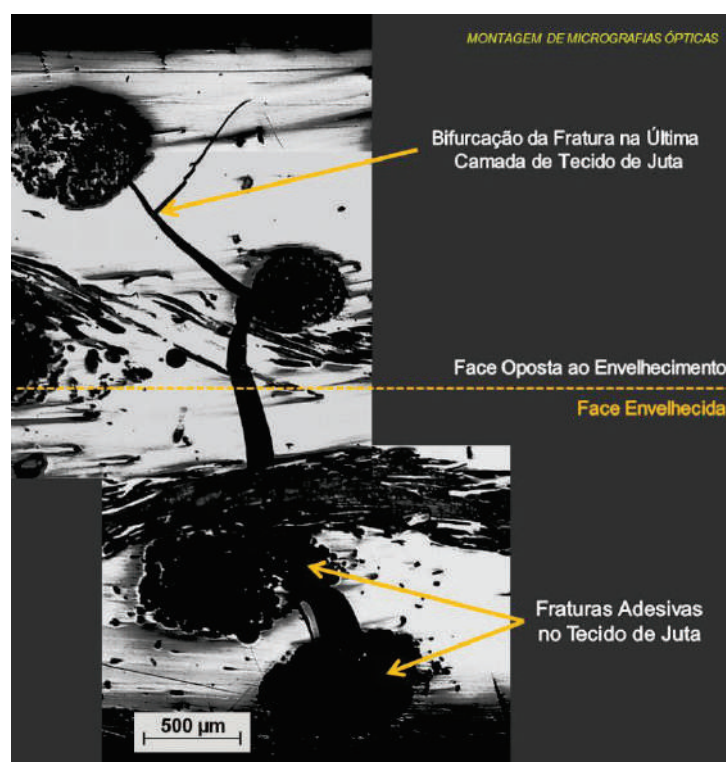


Figura 5.31. Laminado **BJ-E** – Fratura final na flexão em três pontos.

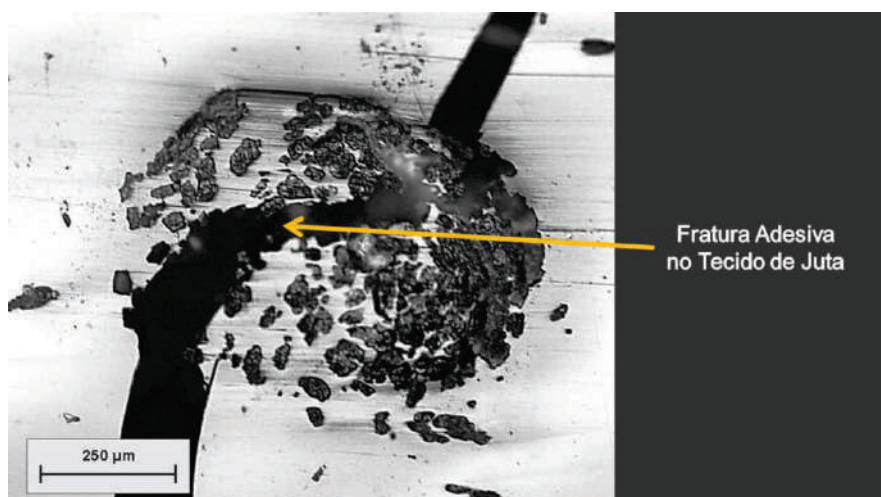


Figura 5.32. Laminado **BJ-E** - Fratura adesiva no tecido de juta.

Já na análise da seção transversal de fratura final, a microscopia eletrônica de varredura, mostra outros tipos de danos como fratura de fibras de juta, fratura adesiva caracterizada tanto pela presença de furos na matriz quanto da desaderência na interface fibra/matriz (superfícies limpas das fibras), ver figura 5.33.

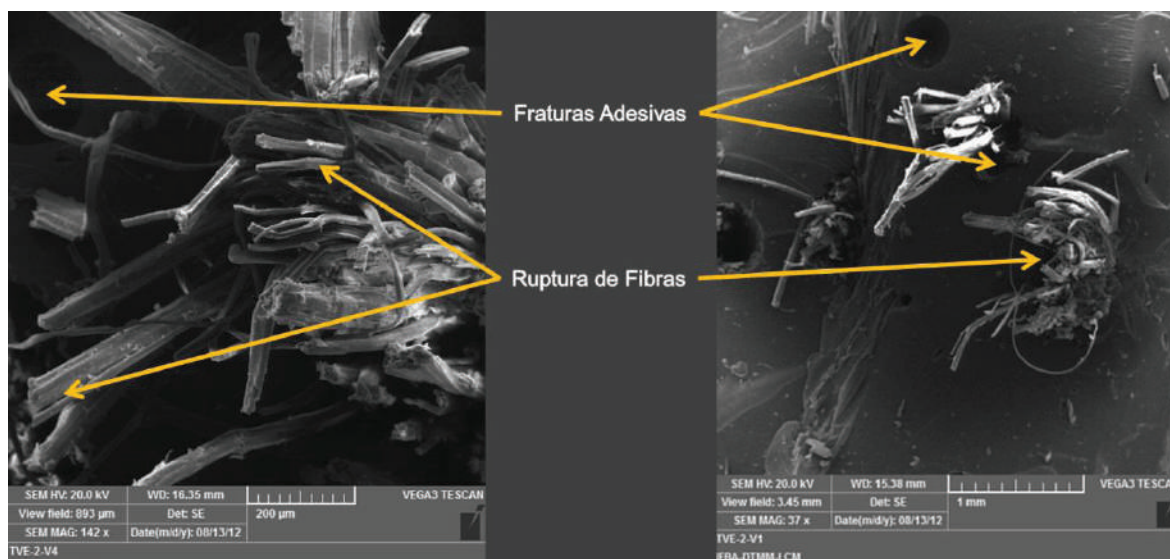


Figura 5.33. Laminado **BJ-E** - Rupturas de fibras e fraturas adesivas na região de fratura final na flexão em três pontos.

### 5.3. Influência do Envelhecimento Acelerado nas Propriedades Mecânicas do Laminado BJ-E

A análise da influência do envelhecimento ambiental acelerado do laminado **BJ-E** será realizado em duas partes. Primeiro através da observação do perfil das curvas médias de desempenho na tração uniaxial e flexão em três pontos por intermédio do diagrama tensão versus deformação e tensão versus deflexão.

As curvas médias foram calculadas através dos valores médios relativos de cinco corpos de prova para cada ensaio. Segundo através de gráficos de barras comparativos para verificar a variação (ganho e perda) das propriedades mecânicas: tensão última, tensão máxima, módulos de elasticidade, percentual de deformação e de deflexão. Como referência será utilizada os dados de desempenho do laminado em estado original, já apresentados no tópico 5.1.

#### 5.3.1. Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Laminado BJ

A influência do envelhecimento na integridade estrutural do material pode ser avaliada a partir dos comportamentos observados no diagrama comparativo das curvas



médias da tensão versus deformação entre o laminado **BJ** e o laminado **BJ-E** referente aos ensaios de tração uniaxial e apresentado na figura 5.34.

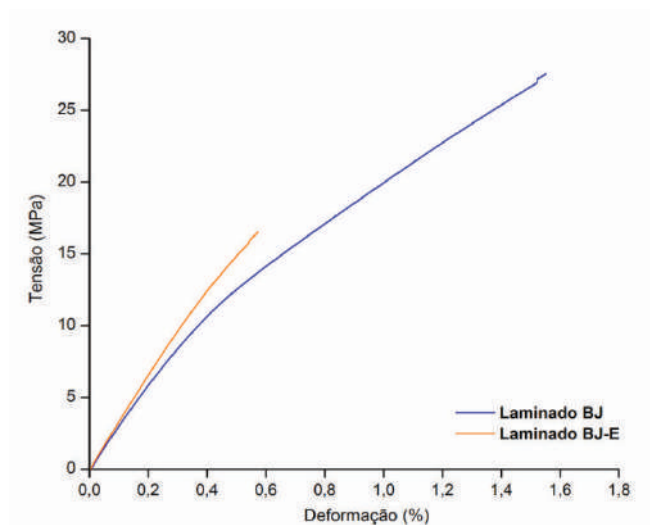


Figura 5.34. Diagrama comparativo de tensão versus deformação: laminado **BJ** x laminado **BJ-E** na tração uniaxial.

O laminado **BJ** quando afetado pelos fatores climáticos adotados no teste de envelhecimento acelerado perde parte das propriedades mecânicas registradas pelo mesmo em estado original, principalmente no que se refere à resistência do material. A mudança de módulo verificado no estado original, ocorrido após iniciado o processo de dano, não ocorreu no **BJ-E**, que seguiu linear, rompendo de maneira frágil pouco acima dos 15 MPa, sofrendo reduzida deformação.

A variação nos valores de tensão última, no módulo de elasticidade e no percentual de deformação pós-ensaio de tração uniaxial pode ser observada nos comparativos das figuras 5.35, 5.36 e 5.37 respectivamente.

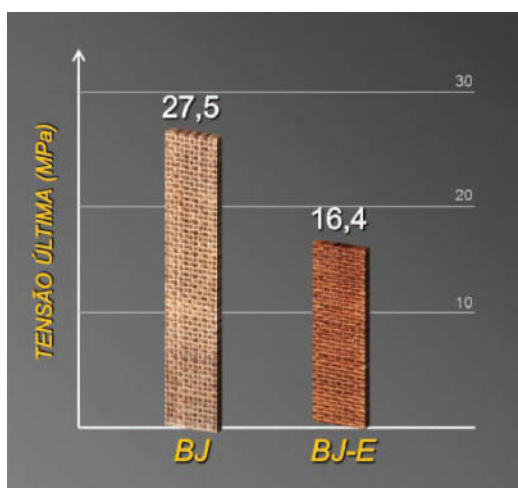


Figura 5.35. Comparativo: Laminado **BJ** x laminado **BJ-E** na tensão última.

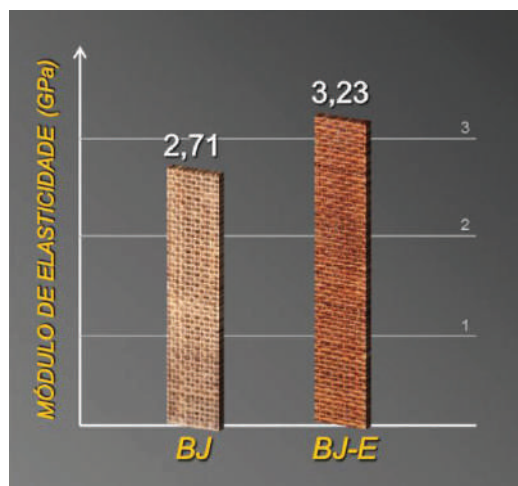


Figura 5.36. Comparativo: Laminado **BJ** x laminado **BJ-E** no módulo de elasticidade.

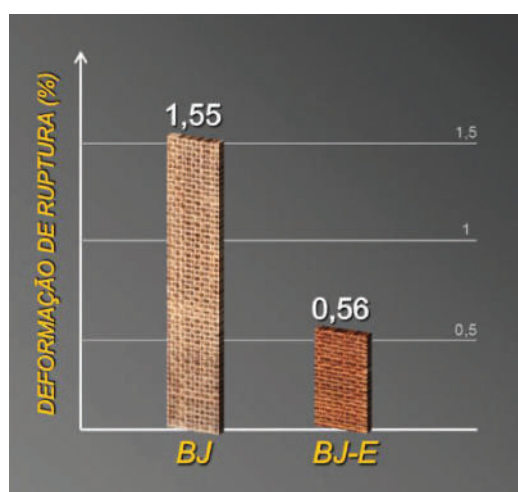


Figura 5.37. Comparativo: Laminado **BJ** x laminado **BJ-E** na deformação de ruptura.

O laminado **BJ-E** reteve pouco as propriedades mecânicas de tensão última e de deformação, porém houve uma melhora de 16,1% em seu módulo de elasticidade, como se percebe na tabela 5.9.

Tabela 5.9. Variação de propriedades mecânicas do laminado **BJ-E** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Laminado BJ	Laminado BJ-E	VARIAÇÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	27,5	16,4	- 40,3%
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,71	3,23	+ 16,1%
Deformação de Ruptura (%)	1,55	0,56	- 63,8%

O acréscimo registrado no valor do módulo de elasticidade para o laminado **BJ-E**, para o caso de cargas de tração, também foi verificado em outros tipos de compósitos submetidos ao mesmo processo de envelhecimento ambiental acelerado (Felipe R., 2012)

(Rodrigues *et al.*, 2012). Entretanto ressalta-se aqui que em todos os trabalhos de investigação citados, que se referem aos tipos de laminados estudados, quando envolviam apenas fibras sintéticas (vidro/kevlar), menos afetadas pelo processo de envelhecimento. No caso dos laminados híbridos com presença tanto de fibras de vidro quanto de fibras naturais, os respectivos módulos de elasticidade apresentaram pouca influência do processo de envelhecimento já que o percentual de perda registrado foi muito pequeno comparado ao da perda na resistência.

A tendência de aumento no módulo de elasticidade na tração para o laminado **BJ** envelhecido configura um fato positivo, visto que este é um fenômeno típico dos compósitos reforçados por fibras sintéticas, porém não é observado em biocompósitos. Seldén *et al.* (2004) verificou perdas moderadas ao degradar por até 60 dias com radiação ultravioleta amostras de polipropileno reforçado por resíduos de madeira. Noutro trabalho Le Duigou *et al.* (2009) também observaram perdas ao envelhecer na água salgada em temperatura superior a 40°C amostras de PLLA (polylactic acid) com fibras de linho.

### 5.3.2. Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Laminado BJ-E

O diagrama comparativo de tensão versus deflexão entre o laminado **BJ** e o laminado **BJ-E** referente aos ensaios de flexão em três pontos é apresentado na figura 5.38.

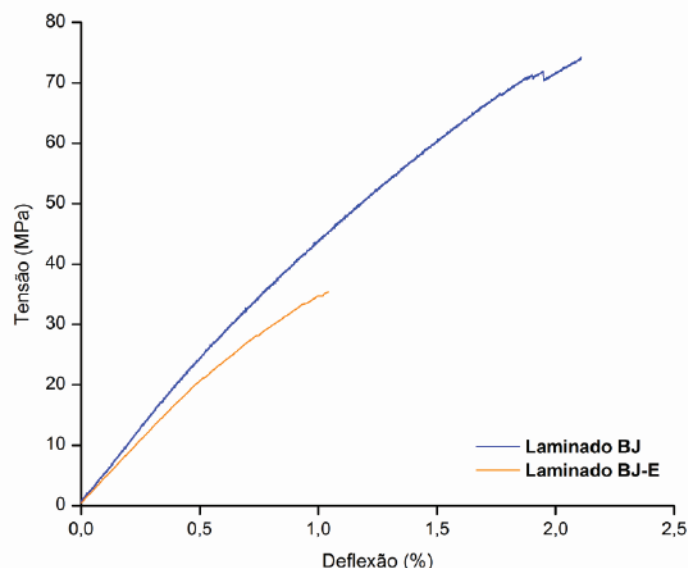


Figura 5.38. Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: laminado **BJ** x laminado **BJ-E** na flexão em três pontos.

O comportamento linear até a fratura do diagrama de tensão versus deflexão do laminado **BJ** não se repetiu no laminado envelhecido. Os pequenos picos ao longo das

curvas, indicadores da formação do dano também não estiveram presentes no laminado **BJ-E** que rompe de maneira bastante frágil e com leve perda de módulo, mais perceptível após o 20 MPa.

A variação nos valores de tensão máxima, no módulo de elasticidade e no percentual de deflexão pós-ensaio de flexão em três pontos do laminado **BJ-E** pode ser observada nos comparativos das figuras 5.39, 5.40 e 5.41 respectivamente.

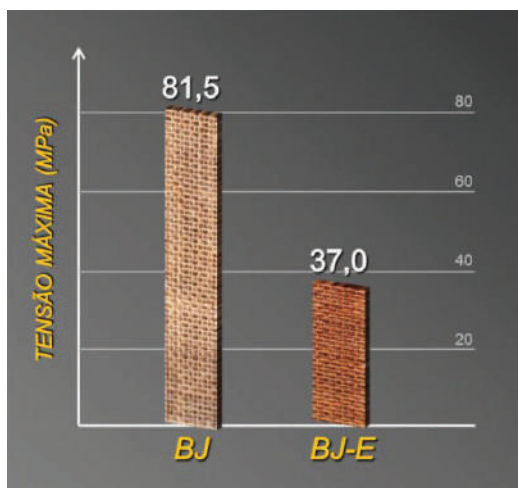


Figura 5.39. Comparativo: laminado **BJ** x laminado **BJ-E** na Tensão Máxima.

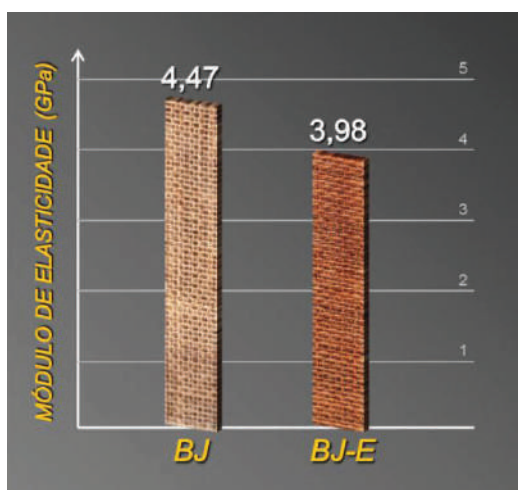


Figura 5.40. Comparativo: laminado **BJ** x laminado **BJ-E** no módulo de elasticidade na flexão.

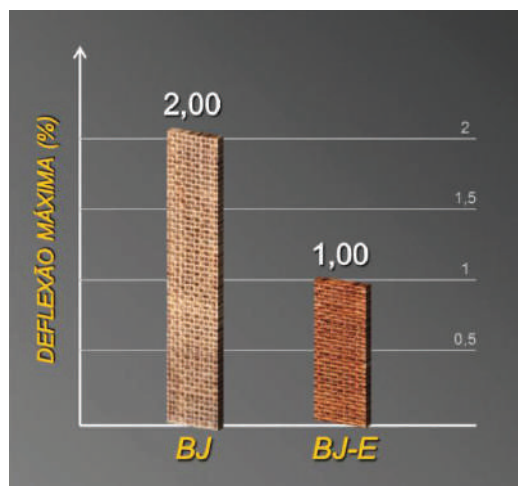


Figura 5.41. Comparativo: laminado **BJ** x laminado **BJ-E** na deflexão máxima.

Na análise comparativa é possível concluir que o envelhecimento do laminado **BJ** compromete consideravelmente o desempenho do material em todas as propriedades mecânicas aqui verificadas, especialmente na tensão e deflexão máximas, as quais tiveram reduzido suas capacidades em mais da metade do apresentado pelo material não envelhecido, como observado na tabela 5.10.

Tabela 5.10. Variação de propriedades mecânicas do laminado **BJ-E** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Laminado BJ	Laminado BJ-E	VARIAÇÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	81,5	37,0	- 54,6%
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,47	3,98	- 10,9%
Deflexão Máxima (%)	2,00	1,00	- 50,0%

Como observado na tabela acima, não ocorreram variações positivas na flexão para o laminado envelhecido, nem mesmo em se tratando do módulo, como ocorrido na tração uniaxial. Tal fato não é incomum, ao analisar o comportamento mecânico de compósitos híbridos expostos ao mesmo processo de envelhecimento aqui estudado. R. Felipe (2012) também verificou variações positivas no módulo durante ensaio de tração, e negativa nas propriedades na flexão em três pontos, como visto aqui.



## CAPÍTULO VI

### 6 PAINEL BMJ - RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Neste capítulo serão apresentados os aspectos macro e microestruturais do biocompósito do tipo painel sanduíche nas várias condições de estudo: estado original (painel **BMJ**), após influência dos fatores climáticos utilizados no teste de envelhecimento ambiental acelerado (painel **BMJ-E**) e no estado úmido saturado quando imersos em água destilada e água do mar (painel **BMJ-U**).

Com relação às propriedades físicas, serão apresentados os resultados dos ensaios de densidade volumétrica do painel **BMJ** em estado original.

Os desempenhos mecânicos obtidos nos ensaios de tração e compressão uniaxial, e flexão em três pontos, serão analisados a partir dos diagramas tensão versus deformação (para o caso das cargas uniaxiais) e tensão versus deflexão (para o caso das cargas de flexão). Apenas o painel no estado original passou por todos estes ensaios, os demais em estado envelhecido aceleradamente e por saturação no meio úmido que apresentou maior absorção (água destilada) não foram ensaiados na compressão uniaxial.

Os dados sobre as resistências últimas à tração e compressão, tensão máxima na flexão, assim como os módulos de elasticidade serão abordados em tabelas conjuntamente aos diagramas. Ressalta-se que para todos os ensaios realizados, os módulos de elasticidade foram medidos antes da carga de início do dano, uma variável dependente do tipo de carregamento e do biocompósito, de forma a evitar qualquer influência desta nos resultados. Ao apresentar o desempenho do painel **BMJ-E** será observada a deterioração por perda de massa sofrida, durante e após o teste de envelhecimento ambiental acelerado.

A análise e comparação entre os compósitos da fratura mecânica, tal como quanto aos desempenhos físicos e mecânicos apresentados e posteriores avaliações pós-envelhecimento ambiental acelerado serão apresentados ao final deste capítulo.

#### 6.1. Painel BMJ

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões referentes ao painel **BMJ** no estado original, ou seja, sem ser exposto a qualquer fator de envelhecimento.

### 6.1.1. Característica Microestrutural do Painel BMJ

A laminação manual utilizada para a fabricação do painel **BMJ** origina geralmente uma distribuição não uniforme entre reforço e resina, possibilitando um desalinhamento com relação à aplicação da carga, podendo influenciar nas propriedades mecânicas do compósito produzido. No tocante a minimizar tais condições, a utilização de um núcleo delimitado pelo véu de poliéster e por tecidos bidirecionais de juta ao invés do uso de fibras dispostas aleatoriamente no biocompósito, teve por objetivo melhorar a distribuição das tensões no material através de uma estrutura mais regular no interior do painel.

Apesar de utilizada com percentuais de catalisador e acelerador dentro dos limites recomendados no boletim do fabricante, foram observados na resina náutica: viscosidade e reduzido tempo para o início da cura, que contribuíram para a formação de algumas bolhas e vazios entre as camadas, dificultando a execução de um painel com melhor acabamento e uma espessura mais uniforme (fig. 6.1). Contudo a inspeção microscópica dos corpos de prova, a intensidade e presença dos defeitos de fabricação não interferiram de forma danosa na resposta final do **BMJ**, porém afeta sua estética, aspecto relevante para aplicação externa. De qualquer forma esse problema pode ser facilmente contornado com o aprimoramento no processo de fabricação, como por exemplo, tempo de cura, a utilização de moldes fechados já na dimensão final dos painéis a serem produzidos e utilização de *gel-coat* e/ou vernizes apropriados a um bom acabamento superficial.

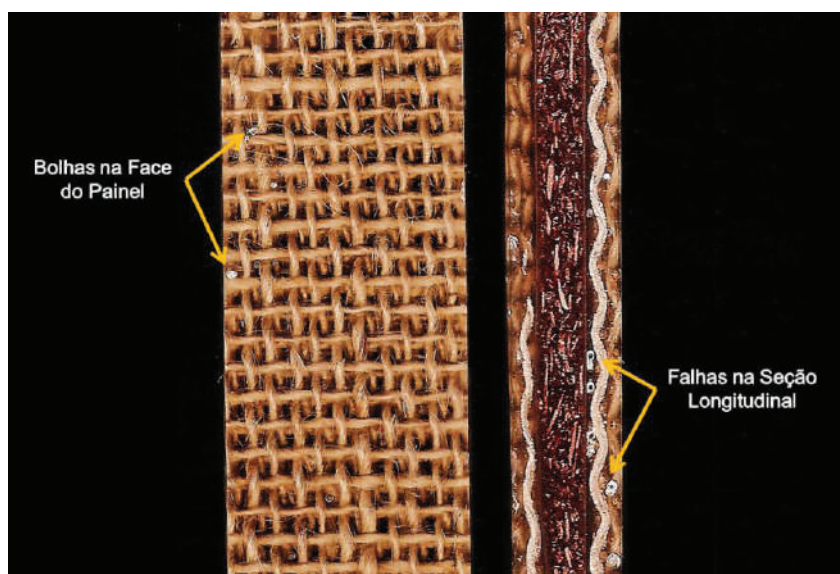


Figura 6.1. Presenças de bolhas superficiais na face e na seção longitudinal do painel **BMJ**.

É observada a presença de algumas bolhas tanto na face do painel **BMJ**, quanto em sua seção longitudinal, concentrados em maior número, próximos à região da interface

entre o núcleo de resíduos de madeira e as camadas mais adjacentes de tecido bidirecional de fibras de juta. Na figura 6.2 mostra-se a microestrutura da seção longitudinal (espessura) do painel **BMJ**, obtida com imagens de microscópio óptico de um corpo de prova.

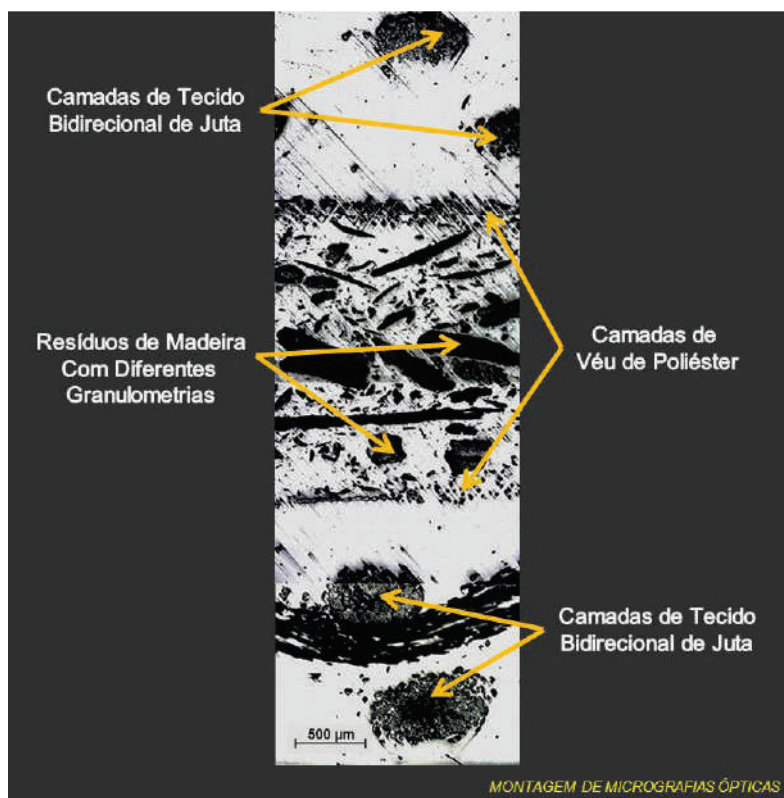


Figura 6.2. Painel **BMJ** - Seção longitudinal do CP.

Nessa análise podem ser visualizados aspectos como a composição dos resíduos de madeira na concepção do núcleo do painel, além da distribuição espacial das camadas, material de ligação (véus de poliéster) entre o núcleo e os tecidos bidirecionais de reforços de fibras de jutas.

### 6.1.2 Ensaio de Densidade Volumétrica do Painel BMJ

A densidade volumétrica média do painel **BMJ** com sua dispersão está apresentada na tabela 6.1.

Tabela 6.1. Densidade volumétrica média do painel **BMJ**.

MATERIAL	VALORES MÉDIOS (g/cm <sup>3</sup> )	DISPERSÃO (%)
Painel BMJ	1,18	0,8

A densidade registrada foi menor que a densidade média de um de seus reforços, a fibra de juta que tem uma densidade volumétrica média de  $1,3\text{g/cm}^3$  (Banco de dados da BPMCC – DEM/UFRN, 2008).

Já quanto ao outro reforço natural presente no núcleo do painel, a densidade básica da fibra da madeira é bastante variável, pois os resíduos utilizados para a formação do mesmo são provenientes de diferentes partes da árvore, provenientes de diferentes tipos e idades de madeiras tropicais e do semiárido brasileiro, o que torna difícil realizar qualquer tipo de comparação direta com o biocompósito fabricado. Entretanto, a densidade registrada pelo painel **BMJ** pode ser considerada baixa, um resultado que o torna útil para aplicação como revestimento ou em estruturas leves. É importante ressaltar também a reduzida dispersão apresentada pelo material.

A medição da densidade volumétrica é importante, pois permite o cálculo da resistência específica e do módulo de elasticidade específico dos biocompósitos desenvolvidos, o que permite sua comparação com outros materiais não convencionais e com tipo de aplicação similar ao planejada para uso do painel **BMJ**.

### 6.1.3 Painel BMJ – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial

No diagrama da tensão versus deformação do painel **BMJ** no estado original é apresentado na figura 6.3.

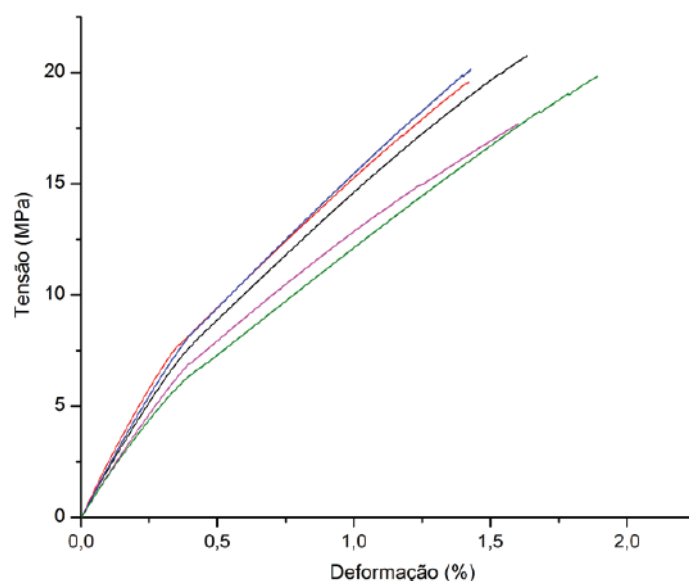


Figura 6.3. Diagrama tensão versus deformação do Painel **BMJ** na tração uniaxial.

Nas curvas de desempenho mecânico do ensaio de tração uniaxial percebe-se que antes de alcançarem a metade da carga máxima, aproximadamente entre 6,0 e 8,0 MPa de resistência última, ocorre uma mudança de módulo, que embora continue seguindo linearmente, marca o início do processo de fratura dos corpos de prova, como visto no diagrama da figura 6.3.

Na tabela 6.2 mostra-se os resultados obtidos com os valores médios de tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa), medido na direção de propagação da carga, e deformação de ruptura (%); além dos valores de suas respectivas dispersões percentuais.

Tabela 6.2. Propriedades mecânicas do painel **BMJ** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	20,07	3,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,02	11,5
Deformação de Ruptura (%)	1,59	18,8

Os valores de dispersão mais elevados encontrados para o painel **BMJ** quando comparado aos valores encontrados para o laminado **BJ** (também no estado original) pode ser atribuído à diversidade das propriedades dos resíduos de madeira, quanto à presença de altas tensões interlaminares na interface entre o núcleo e as camadas adjacentes de reforço, sendo essas originadas pela discrepância entre suas propriedades mecânicas. Ressalta-se que em todos os ensaios realizados os valores das dispersões correspondem à diferença absoluta entre os valores máximos e mínimos encontrados nos mesmos.

#### 6.1.4 Análise da Fratura do Painel BMJ na Tração Uniaxial

Na figura 6.4 são apresentados dois corpos de prova após ensaio de tração realizado no painel **BMJ**. Observa-se que a fratura final é localizada e do tipo **LGM** - Lateral na região Mediana do Comprimento útil (galgo), segundo a norma ASTM D 3039-08. A fratura se apresentou perpendicular à direção da aplicação da carga, característica de um material frágil. O painel concentrou microfissuras na região da fratura final, demonstrando pequenos rasgamentos do tecido de juta, decorrentes da desaderência na interface fibra/matriz na separação mecânica das seções de fratura após o ensaio.



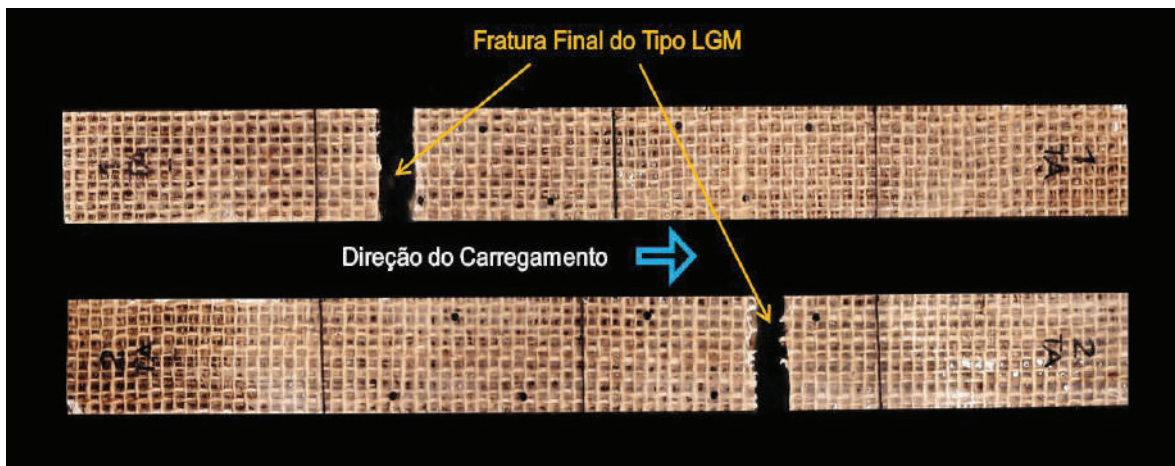


Figura 6.4. Corpos de prova fraturados na tração uniaxial do painel **BMJ**.

O núcleo apresentou o descolamento de alguns resíduos de madeira, como visualizado na figura 6.5.

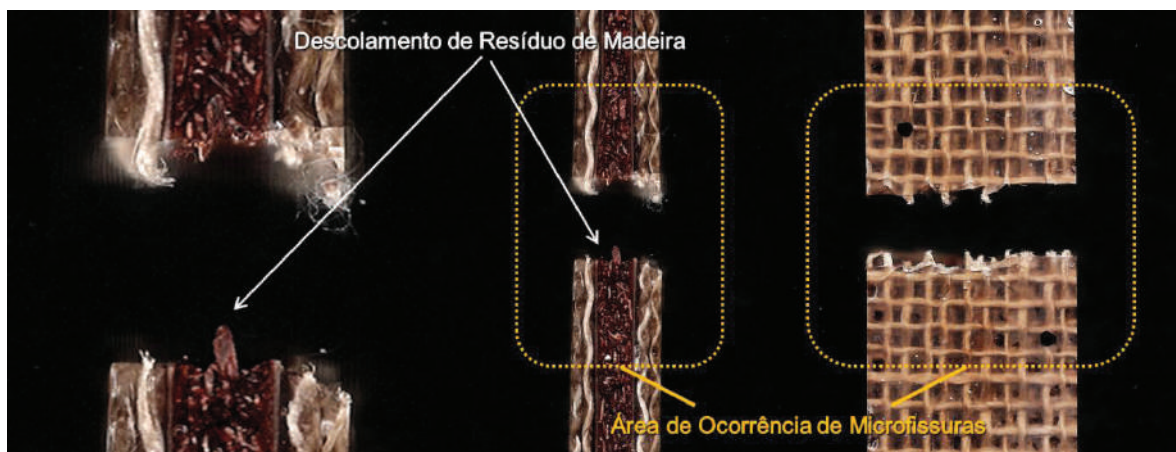


Figura 6.5. Área de concentração de microfissuras do painel **BMJ** após ensaio de tração uniaxial.

De forma geral, na microanálise da fratura, alguns tipos comuns de dano descritos na seção 2.7 foram aqui observados, tais como a presença de microfissuras isoladas e mais próximas à região de fratura final; a presença de delaminação entre as camadas de tecidos de fibras de juta e o núcleo de resíduos de madeira; fratura adesiva e coesiva na resina e rupturas de fibras (na região final da fratura). Porém não foram observadas presenças de fraturas coesivas nas fibras de juta. As microfissuras separam as mechas de tecido sem, contudo, parti-las o que evidencia uma fratura do tipo adesiva.

Por meio da figura 6.6, que mostra a seção de fratura final do painel **BMJ**, é possível perceber alguma irregularidade da fratura, característica comum aos materiais compósitos constituídos por diferentes camadas e interfaces.

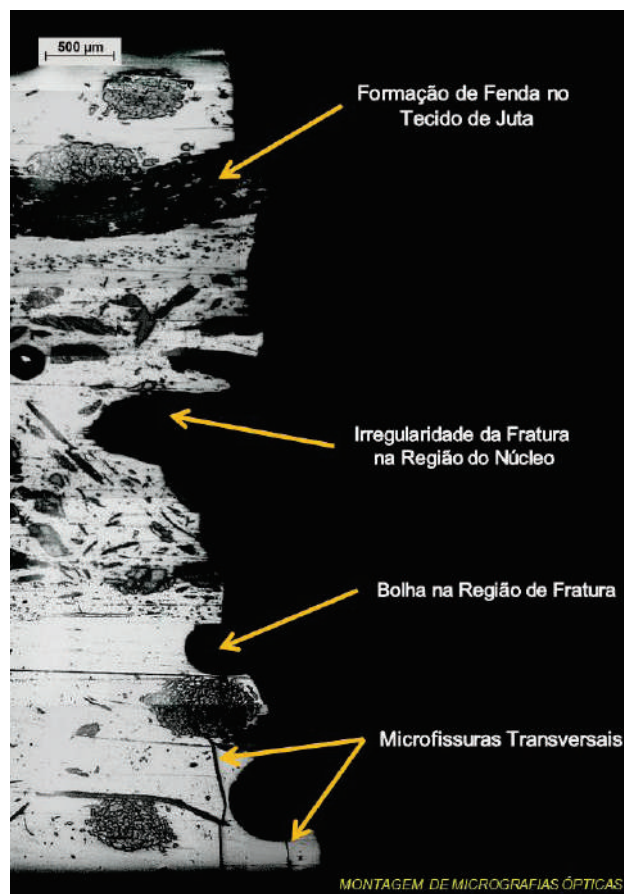


Figura 6.6. Painel **BMJ** - Região de fratura final na tração uniaxial.

A fratura demonstra irregularidades na seção apenas no encontro de bolhas ou de alguns reforços, sobretudo na região do núcleo. Estas falhas são comuns do processo de laminação manual, que favorecem durante o ensaio a formação de fissuras de pequena extensão, causando ao seu encontro o descolamento dos filamentos do tecido de juta.

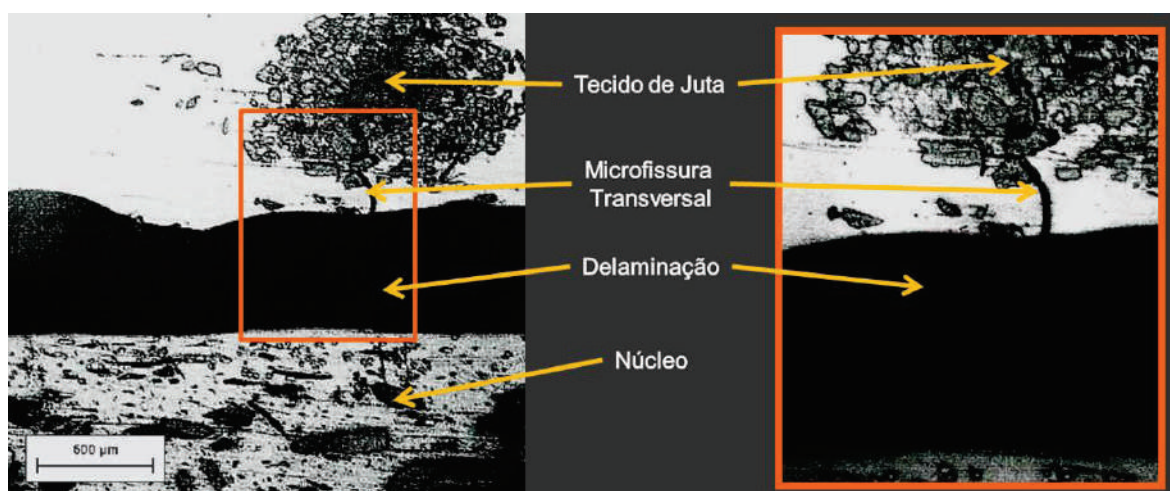


Figura 6.7. Painel **BMJ** - Falha na interface com ampliação da microfissura.



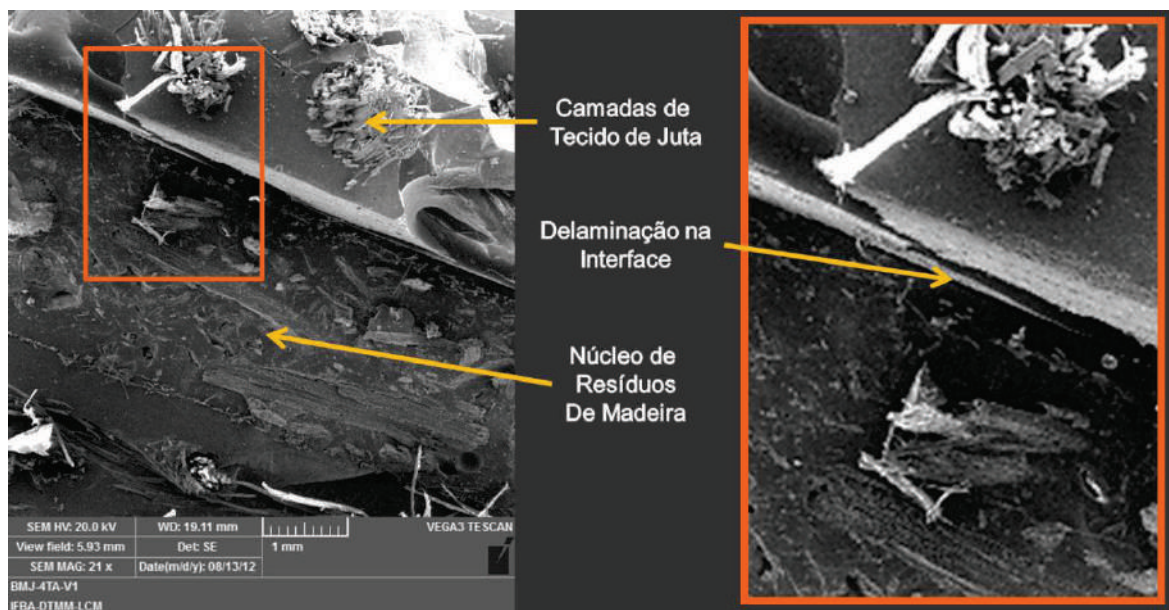


Figura 6.8. Painel **BMJ** - Região de fratura final na tração uniaxial (MEV).

Os tipos de dano ocorridos e descritos anteriormente, como a fenda horizontal originando a delaminação e exemplificada na micrografia óptica da figura 6.7 e também na micrografia de MEV na figura acima.

Mostram-se na figura 6.9 (a e b) outros tipos de dano presentes, como as fraturas dos tipos adesiva (interface fibra/matriz) e coesiva na resina, além da ruptura de fibras.

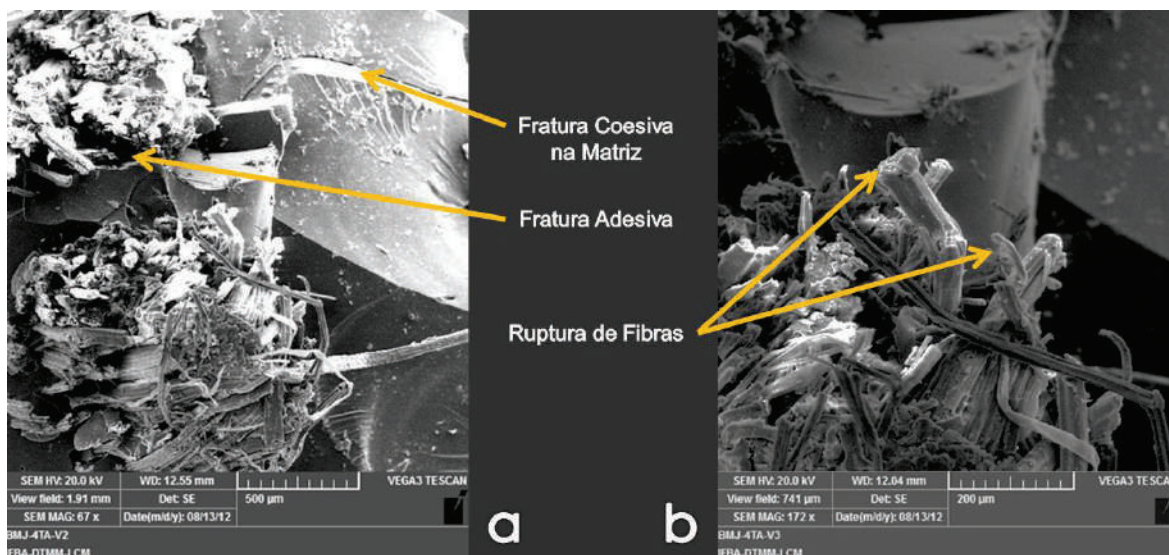


Figura 6.9. Painel **BMJ** na tração uniaxial: a) Fraturas adesiva e coesiva na matriz; b) Ruptura de fibras.

### 6.1.5 Painel BMJ – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos

Na figura 6.10, que segue, é apresentado o diagrama de tensão versus deflexão do painel **BMJ** no ensaio de flexão em três pontos.

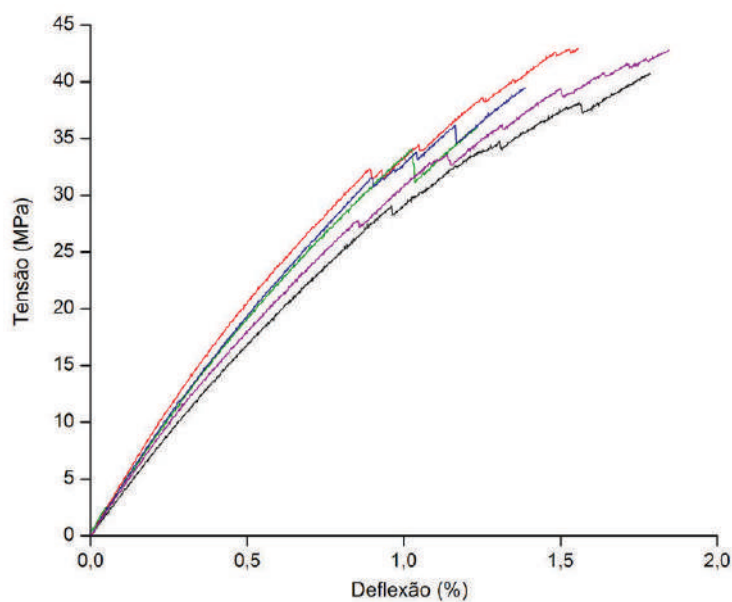


Figura 6.10. Diagrama de tensão versus deflexão do Painel **BMJ**.

Observa-se no diagrama que o material alcançou o dobro da resistência registrada na tração uniaxial, com predominante fragilidade, comportamento esperado para compósitos a base de resina termofixa. Após ultrapassarem a metade da tensão máxima, na faixa entre 25 e 30 MPa, é iniciado o processo de fratura do material, com a formação das fissuras. O início do processo de dano ocasiona a formação de picos nos diagramas até o rompimento efetivo do material.

Os resultados obtidos com os valores médios de tensão máxima na flexão (MPa), módulo de elasticidade na flexão (GPa) e da deflexão máxima, com suas respectivas dispersões é apresentado na tabela 6.3.

Tabela 6.3. Propriedades mecânicas do painel **BMJ** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	41,48	3,6
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,68	11,1
Deflexão Máxima (%)	1,68	12,8

O painel também apresenta valores de dispersão mais elevados para o módulo de elasticidade e de deflexão máxima do que os registrados no laminado em estado original.

### 6.1.6 Análise da Fratura do Painel BMJ na Flexão em Três Pontos

Na figura 6.11 é possível observar na seção longitudinal (espessura) do painel **BMJ** que na flexão em três pontos este apresenta fissuras próximas da região de fratura final. Todas mostram a direção perpendicular à direção das tensões de tração e concentradas nessas camadas, enquanto que na região comprimida, não se observa a nível macroscópico a presença de danos após o ensaio.

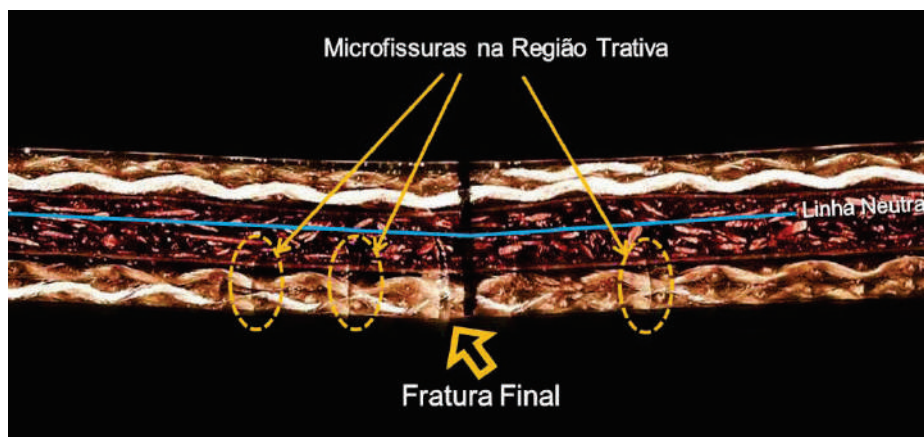


Figura 6.11. Painel **BMJ** - Região de fratura final na Flexão em três pontos.

A formação e propagação da fratura na flexão em três pontos do painel **BMJ** pode ser mais bem observado na montagem da figura 6.12.

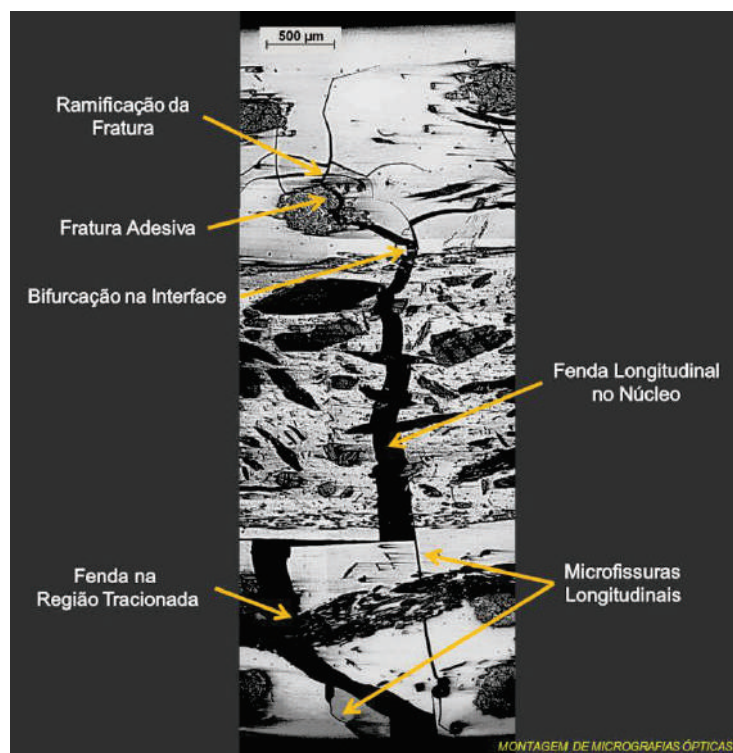


Figura 6.12. Painel **BMJ** - Fratura final na flexão em três pontos.



Na análise microscópica fica evidente a formação e propagação de fendas, as quais se originam mais intensamente na camada tracionada e se propagam, com menor intensidade em direção à camada comprimida. Ressalta-se que quando a fenda se propaga pelo núcleo, esta se manteve com maior regularidade e sem desvios (fratura total do mesmo), enquanto que nas camadas de tecido de fibras de juta surgiram desvios, alguns bruscos, sobretudo na interface com o núcleo.

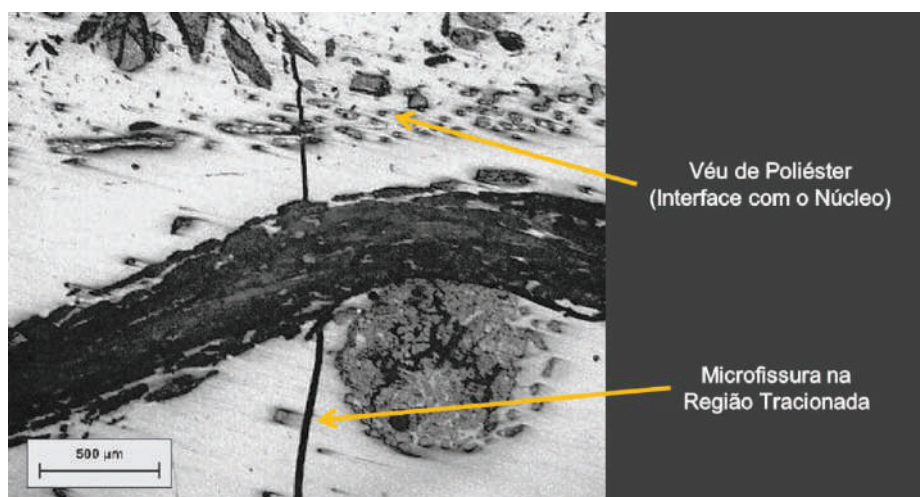


Figura 6.13. Painel **BMJ** - Microfissura na camada do tecido de fibras de juta na flexão em três pontos.

Na figura 6.13 observa-se em detalhe a presença de microfissuras transversais nas camadas de fibras de juta na região tracionada propagando-se em direção ao núcleo. Algumas microfissuras presentes no painel **BMJ** se propagam internamente nas mechas do tecido de juta, muitas vezes descolando seus filamentos, originando a fratura adesiva, como visto na figura 6.14.

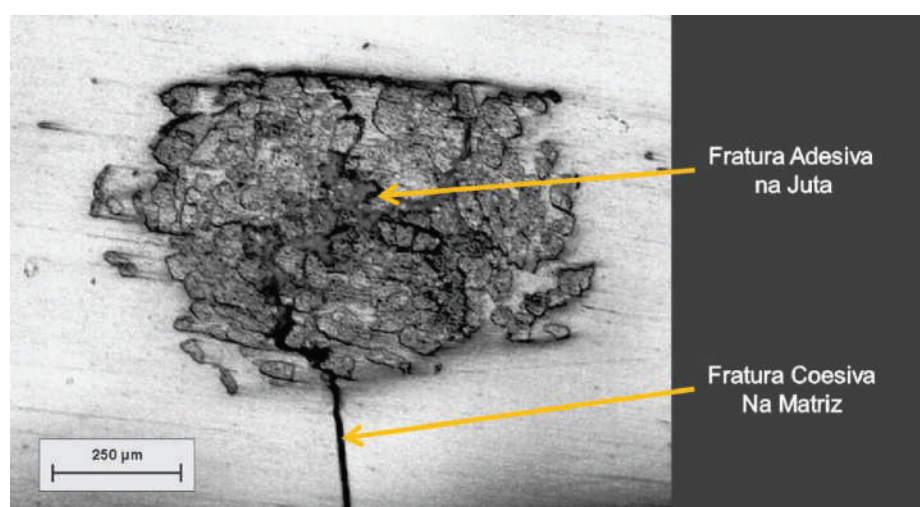


Figura 6.14. Painel **BMJ** - Microfissura na região tracionada na flexão em três pontos.

Através da microscopia eletrônica de varredura, na figura 6.15 (a b) é possível visualizar a formação e propagação da fenda originada da fratura final por flexão. Assim como se observa a ruptura de fibras de juta dentro da camada. Na região do núcleo ocorreram arranques de alguns resíduos de madeira. Em toda a análise não foi observada a presença de delaminação.

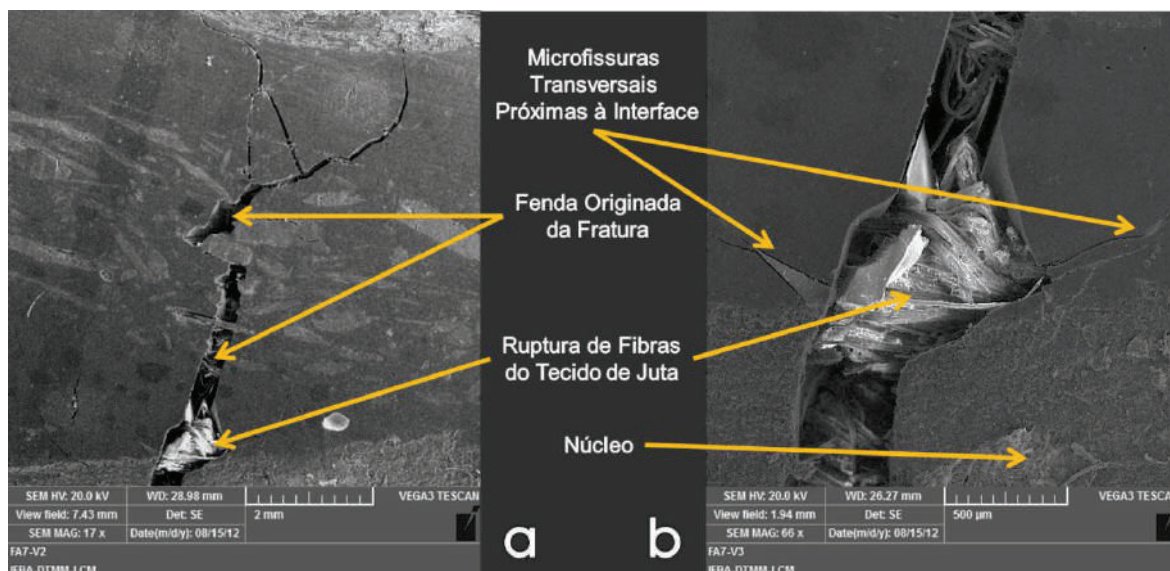


Figura 6.15. Painei **BMJ** – a) Fenda originada na fratura por flexão; b) Ruptura de fibras de juta na região de fratura final.

### 6.1.7 Painei **BMJ** – Desempenho Mecânico na Compressão Uniaxial

Na figura 6.16 mostra-se o diagrama tensão versus deformação do painei **BMJ** obtido no ensaio de compressão uniaxial.

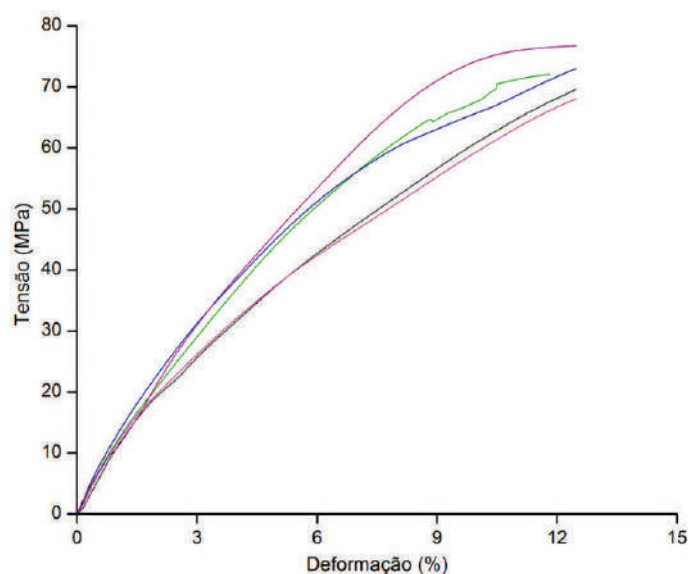


Figura 6.16. Diagrama de tensão versus deformação do Painei **BMJ** na compressão uniaxial.

Diante da compressão uniaxial, o painel **BMJ** apresentou um comportamento diferente do observado no laminado **BJ** nas mesmas condições de ensaio, ou seja, no seu estado original. O módulo de elasticidade apresentou uma reduzida dispersão antes da carga de início de dano, cerca de 20 MPa, quando é iniciado o processo de fratura do material. Ressalta-se, também, que o comportamento observado no laminado **BJ** caracterizado pela alta taxa de deformação sem aumento no valor correspondente da tensão, não foi registrado no painel.

Os resultados obtidos com os valores médios da tensão última (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa), também medido na direção da carga e antes do início do dano, e da deformação de ruptura, com suas respectivas dispersões são apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4. Propriedades mecânicas do painel **BMJ** na compressão uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	71,89	6,7
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,13	12,3
Deformação de Ruptura (%)	12,33	1,1

A maior parte dos corpos de prova ensaiados não sofreu ruptura total da seção, tendo a resistência última coincidido com o descolamento da interface entre a camada de tecido bidirecional de fibras de juta e o núcleo, ou seja, a causa final da fratura decorreu diretamente do processo de delaminação.

#### 6.1.8 Análise da Fratura do Painel BMJ na Compressão Uniaxial

Como já observado, o painel **BMJ** apresentou na compressão uniaxial um comportamento, em termos de resistência mecânica, diretamente relacionada à qualidade da adesão na interface entre as camadas de tecido de fibras de juta com o núcleo de resíduos de madeira. Todas as amostras apresentaram delaminação, como pode ser visto nas figuras 6.17 e 6.18.



Figura 6.17. Processo de delaminação na fratura final na compressão do Painel **BMJ**.

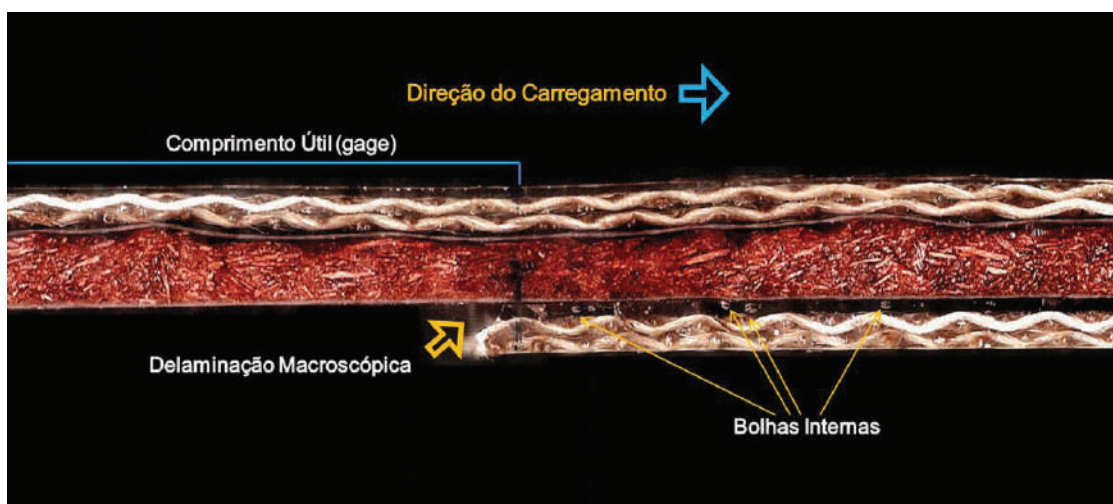


Figura 6.18. Fratura das camadas tracionadas de tecido de juta - Compressão do Painel **BMJ**.

Durante o ensaio, as camadas de tecido bidirecional de juta comprimiram reduzindo seu comprimento total, o mesmo não ocorreu com seu núcleo, o qual não sofreu fissuras, fendas ou qualquer tipo de dano, permanecendo, aparentemente, sem sofrer o processo de compressão ou de redução de seu comprimento. Assim as camadas de tecido de juta apresentaram maior fragilidade entre os reforços utilizados, rompendo-se na região interfacial com formação de delaminação, como observado na figura 6.18.

Na análise da fratura por microscopia óptica, a formação de fendas transversais e de microfissuras ao longo do corpo de prova, originaram a delaminação, mostrada na figura 6.19. A microfissuração apresentou espaçamento médio de aproximadamente 274,80  $\mu\text{m}$  ao longo dos corpos de prova (fig. 6.20).



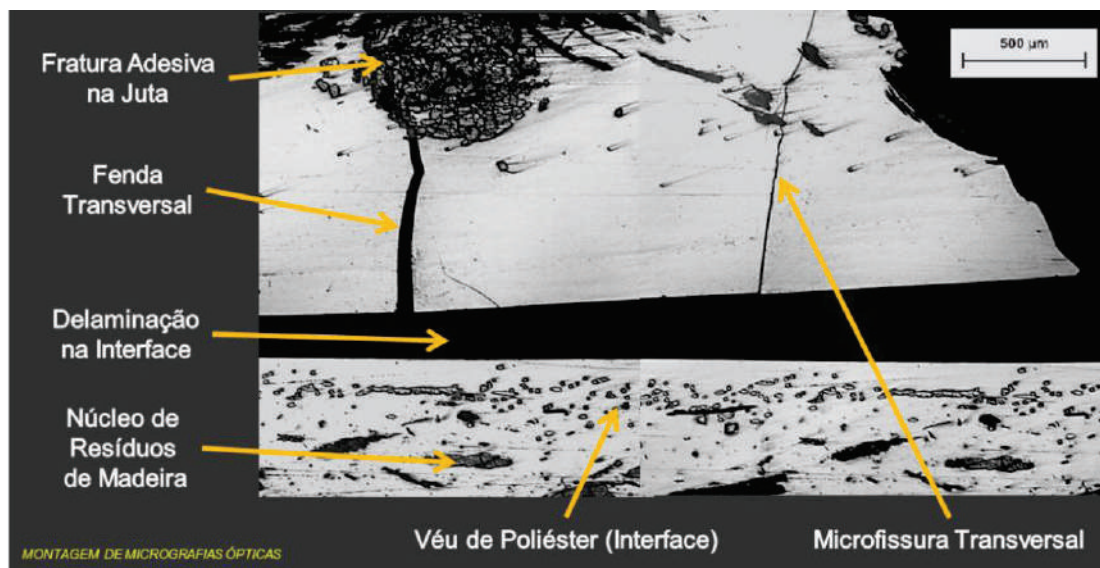


Figura 6.19. Painel **BMJ** - Região de fratura final na compressão uniaxial.

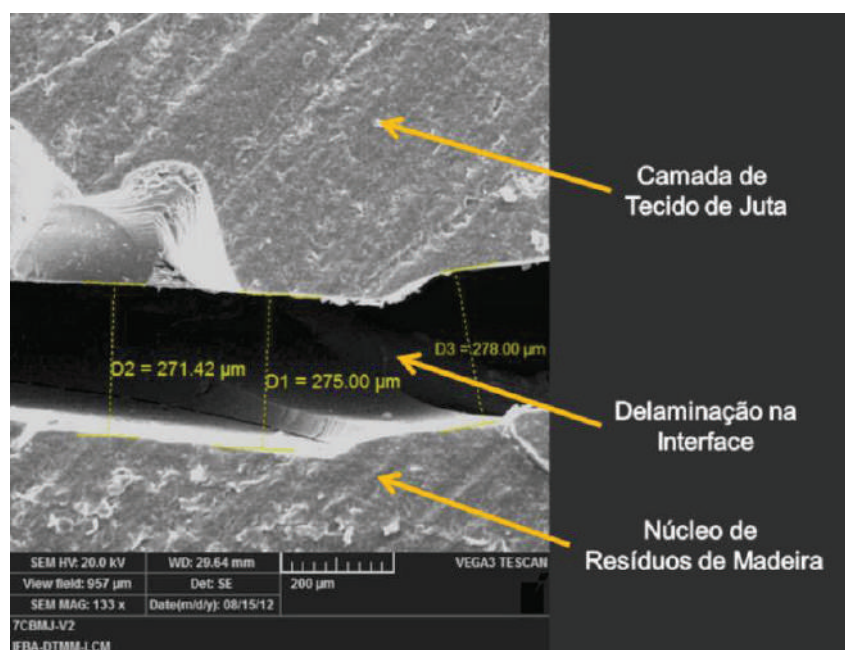


Figura 6.20. Painel **BMJ** - Delaminação na compressão uniaxial.

Na figura 6.21 ilustra-se, em detalhe, a formação de uma fenda transversal durante a aplicação da carga compressiva, próxima da região que sofreu delaminação. A fenda originou ramificações de mesmo sentido, notadamente na região rica de resina, sem, contudo, atingir as mechas nas camadas de reforço.

Ainda com a ajuda da análise por MEV (fig. 6.22) pode-se observar detalhes de algumas características de dano na região da delaminação como a ruptura de fibras do tecido de juta internas a camada.



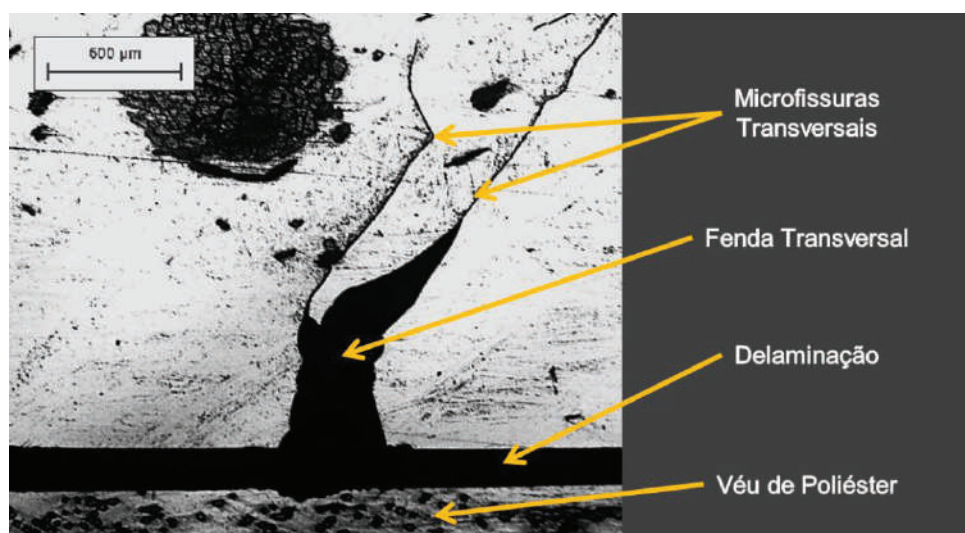


Figura 6.21. Painel **BMJ** - Formação de fenda transversal com microfissuras na compressão.

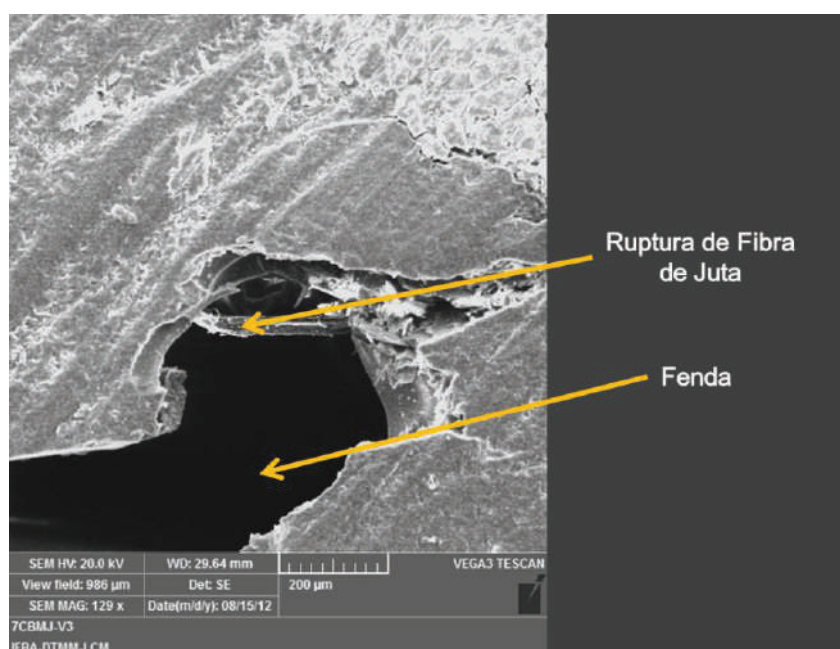


Figura 6.22. Painel **BMJ** - Ruptura de fibras de juta na compressão uniaxial.

## 6.2. Painel BMJ-E

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões referentes ao painel **BMJ-E** após ser exposto aos fatores climáticos do envelhecimento ambiental acelerado.

### 6.2.1. Característica Macroestrutural do Painel BMJ - Fotoxidação

Os corpos de prova do painel **BMJ-E** demonstraram um gradual escurecimento da face exposta ao envelhecimento ambiental acelerado, perceptíveis a partir de aproximadamente 30 dias de exposição.

A mudança cromática do material pode ser observada tanto na face envelhecida, quanto na extensão da metade da seção transversal fraturada ou na sua seção longitudinal, onde a região das camadas de tecido bidirecional de juta, adjacentes a face envelhecida ficaram com uma tonalidade mais alaranjada, se comparado as da região oposta, ou seja, não exposta ao envelhecimento acelerado. Esse fato demonstra a profundidade do ataque do processo de envelhecimento que pode, inclusive, atingir o núcleo do painel. Na figura 6.23 (a, b e c) ilustra-se bem esta reação.

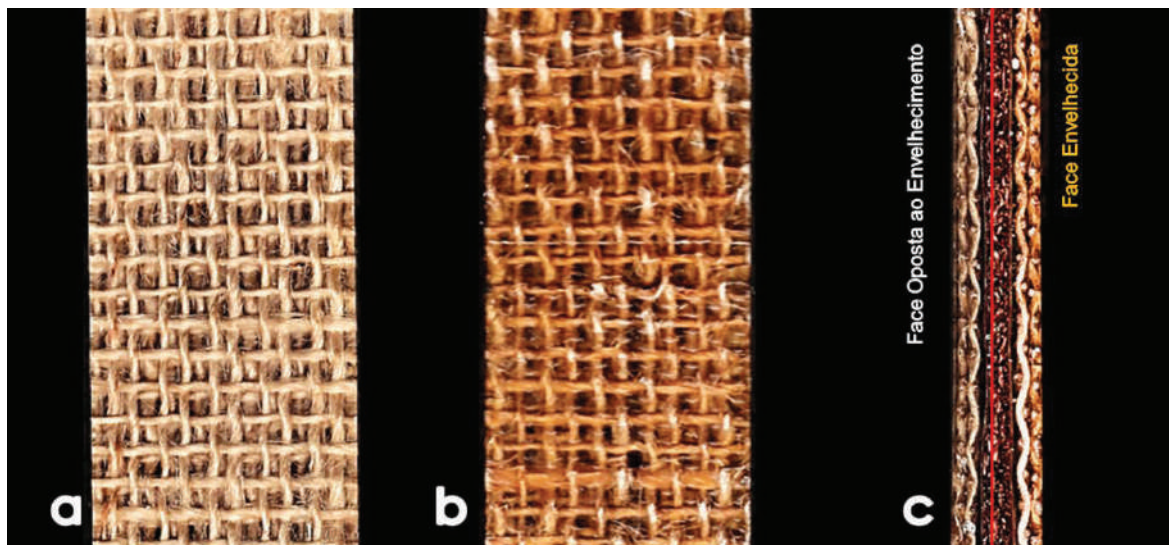


Figura 6.23. Fotoxidação do painel **BMJ-E**: a) Face oposta ao envelhecimento, b) Face envelhecida e c) Espessura do CP envelhecido.

A mudança cromática na superfície da face exposta ao envelhecimento é um fenômeno típico da resina polimérica quando exposta a radiação ultravioleta (Feldman, 2002), entretanto a perda de massa concentrada na matriz, sobretudo em suas camadas mais externas proporcionou a perda do brilho característico da resina náutica, assim como o surgimento de pontos esbranquiçados acompanhando as tramas da camada de tecido de fibras de juta mais externa. Tal efeito é originado devido à aproximação do tecido à superfície do painel **BMJ-E**, como observado na figura 6.24. Na mesma ainda pode ser observada a presença de filamentos da mecha do tecido despendidos da resina, evidenciando a deterioração de sua superfície.

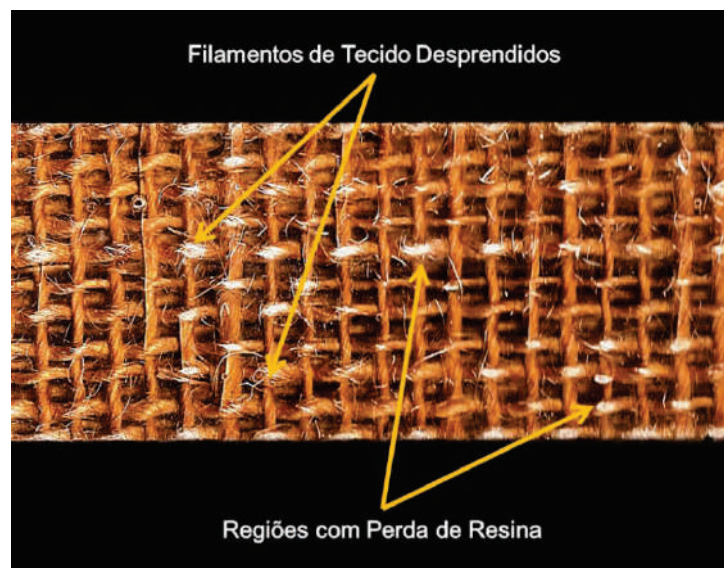


Figura 6.24. Face envelhecida do painel **BMJ-E** com presença de filamentos do tecido de juta desprendido da resina.

A deterioração superficial do painel **BMJ-E** pode ser mais bem observada por meio do comparativo da figura 6.25 (a e b), obtida por microscopia eletrônica de varredura. No detalhe ampliado (6.25 c) pode-se notar a formação de microfissuras em toda extensão da superfície envelhecida.

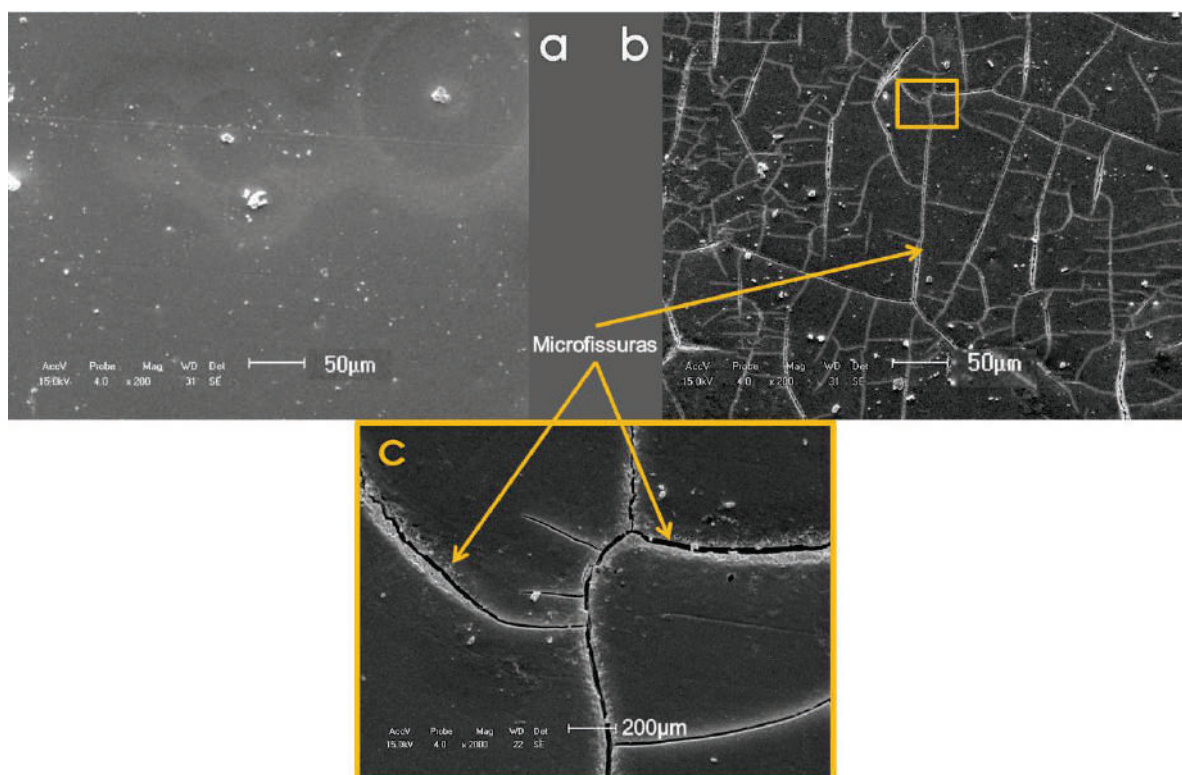


Figura 6.25. MEV do Painei **BMJ**: a) Face oposta ao envelhecimento; b) Face envelhecida; c) detalhe de microfissuras da face envelhecida.



Ressalta-se que essa microfissuração da superfície envelhecida foi também observada no laminado **BJ-E**, contudo no painel não há formação de furos. A ausência da formação dos furos pode estar relacionada com o tempo de gel (o menor percentual de acelerador originou um tempo mais longo de cura para o painel **BMJ**), único parâmetro diferenciado nos dois processos de fabricação utilizados na obtenção dos biocompósitos.

Ainda analisando a deterioração morfológica ocorrida nas faces exposta ao processo de envelhecimento ambiental, registra-se que o sistema fibra/matriz utilizado na concepção de material compósito é fundamental na sua resposta ao envelhecimento, uma vez que a adesão interfacial torna-se um parâmetro primordial. Esse comportamento mais uma vez é fundamentado pela ausência do processo de desaderência na interface fibra/matriz (tanto no laminado **BJ-E** quanto no painel **BMJ-E**) e originado de forma intensa nos compósito à base de resina poliéster reforçada com fibra de vidro, já observado na figura 5.22 (a, b e c) (Felipe R., 2012).

### 6.2.2. Deterioração por Perda de Massa do Painel BMJ-E

Os percentuais de perda de massa do painel **BMJ-E** são apresentados na figura 6.26.

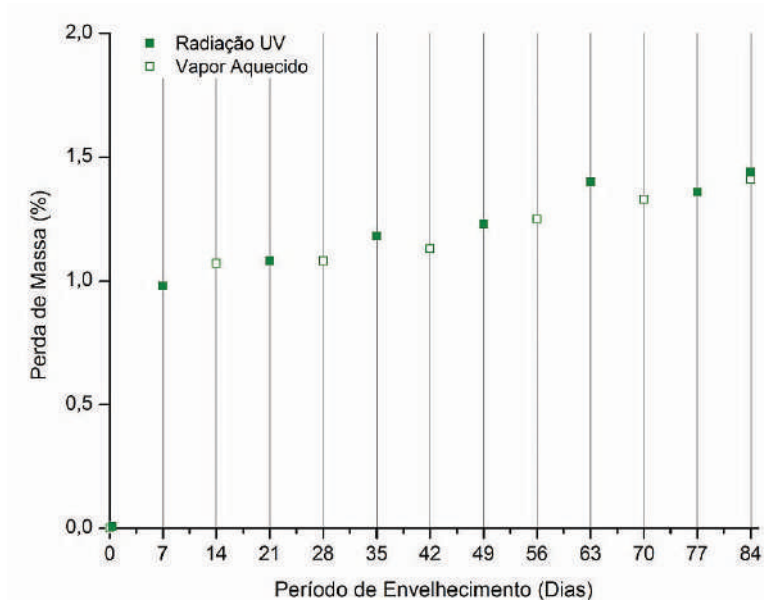


Figura 6.26. Painel **BMJ-E** Perda média de massa após radiação UV e vapor aquecido.

Trata-se de valores médios obtidos nos corpos de prova de tração uniaxial através da pesagem periódica já descrita. A figura abaixo mostra a perda média de massa ao longo

dos 84 dias de ensaio, pesadas imediatamente após exposição à radiação ultravioleta e após exposição de vapor aquecido durante o mesmo período.

O painel **BMJ-E** apresentou durante o envelhecimento um comportamento semelhante tanto na pesagem realizada após a exposição à radiação ultravioleta, quanto na pesagem realizada após as horas de exposição ao vapor aquecido. Em oposição aos compósitos reforçados por fibras sintéticas, o painel envelhecido não apresentou um progressivo e linear aumento a partir do zero nas primeiras pesagens (Rodrigues, L., 2007).

Observa-se que, para os corpos de prova **BMJ-E** em ambos os casos de exposição, o primeiro registro demonstrou uma perda de massa em torno de 1%, o que corresponde a cerca de 70% da perda média alcançada ao final do teste de envelhecimento acelerado. A perda se elevou moderadamente ao longo do teste, finalizando um pouco abaixo dos 1,4%, com leve oscilação nas três últimas pesagens.

As tabelas 6.5 e 6.6 apresentam um comparativo entre a primeira pesagem e a última pesagem, também observando a variação média na perda de massa durante o teste, cada média com sua respectiva dispersão, aqui determinada como a diferença absoluta entre os resultados obtidos.

Tabela 6.5. Perda percentual de massa do painel **BMJ-E** pós-radiação ultravioleta.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO	PERDA DE MASSA (%)	DISPERSÃO (%)
<b>BMJ-E após 07 Dias</b>	0,98	4,0
<b>BMJ-E após 84 Dias</b>	1,44	3,4

Tabela 6.6. Perda percentual de massa do painel **BMJ-E** pós-vapor aquecido.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO	PERDA DE MASSA (%)	DISPERSÃO (%)
<b>BMJ-E após 14 Dias</b>	1,07	5,6
<b>BMJ-E após 84 Dias</b>	1,41	5,6

### 6.2.3. Painel **BMJ-E** – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial

O diagrama de tensão versus deformação do painel **BMJ-E** obtido no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 6.27. Observa-se que nas curvas de desempenho mecânico que a relação entre a tensão e a deformação pode ser considerada linear até a fratura final. Ressalta-se aqui que a mudança de módulo registrada no painel **BMJ** no seu estado original, não foi verificada no painel **BMJ** envelhecido.



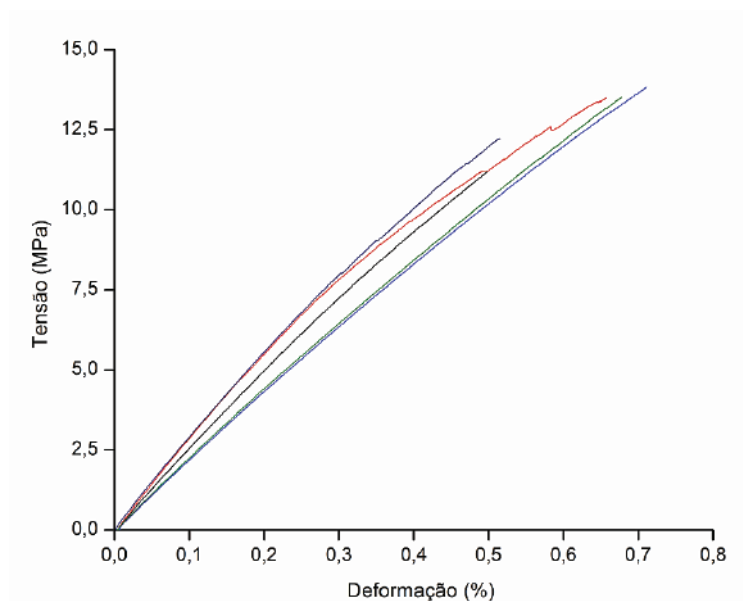


Figura 6.27. Diagrama de tensão versus deformação do Painel **BMJ-E** na tração uniaxial.

Na tabela 6.7 mostram-se os resultados obtidos com os valores médios de resistência última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa) e deformação de ruptura (%); além dos valores de suas respectivas dispersões percentuais.

Tabela 6.7. Propriedades mecânicas do painel **BMJ-E** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	13,26	4,2
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,48	11,5
Deformação de Ruptura (%)	0,63	10,8

Apesar da uniformidade do perfil observada no comportamento de tensão versus deformação, as dispersões observadas na tensão última, módulo de elasticidade e deformação de ruptura se verificam praticamente nos mesmos níveis encontrados para o mesmo painel no estado original.

#### 6.2.4 Análise da Fratura do Painel **BMJ-E** na Tração Uniaxial

Na figura 6.28 são apresentados dois corpos de prova do painel **BMJ-E** após ensaio de tração uniaxial. Todas as amostras apresentaram um modo de fratura final do tipo **LGM** (ASTM D 3039-08). A mesma se mostra de forma localizada, ou seja, característica semelhante à obtida no painel na condição original.

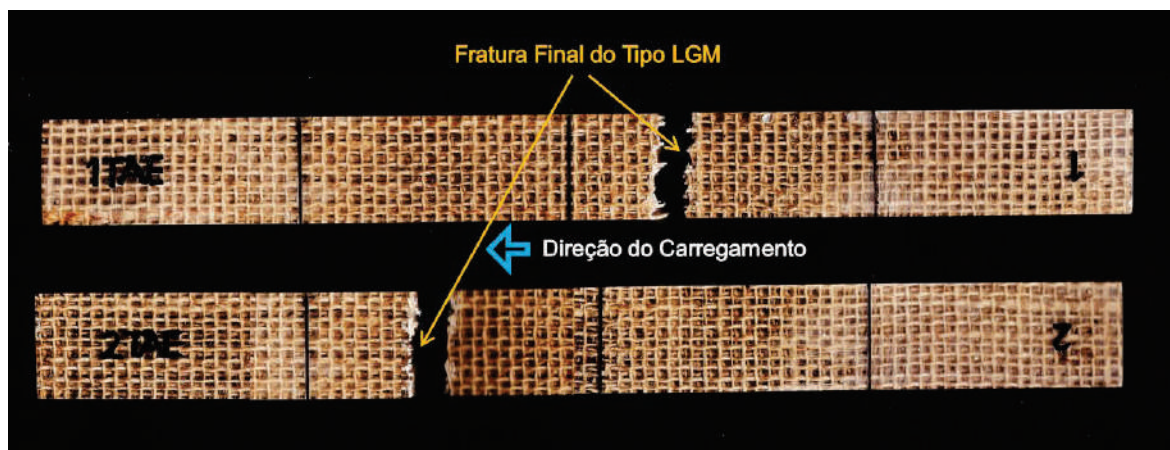


Figura 6.28. Paineis **BMJ-E** – Corpos de prova fraturados na tração uniaxial.

Com o objetivo de um melhor entendimento da influência do processo de envelhecimento na formação e propagação da fratura, uma análise através da micrografia óptica foi realizada consistindo na montagem de imagens da região de fratura final. Para tanto foi delimitada a área visivelmente atingida pelo envelhecimento, que corresponde a aproximadamente metade da seção transversal da amostra, como evidencia a figura 6.29.

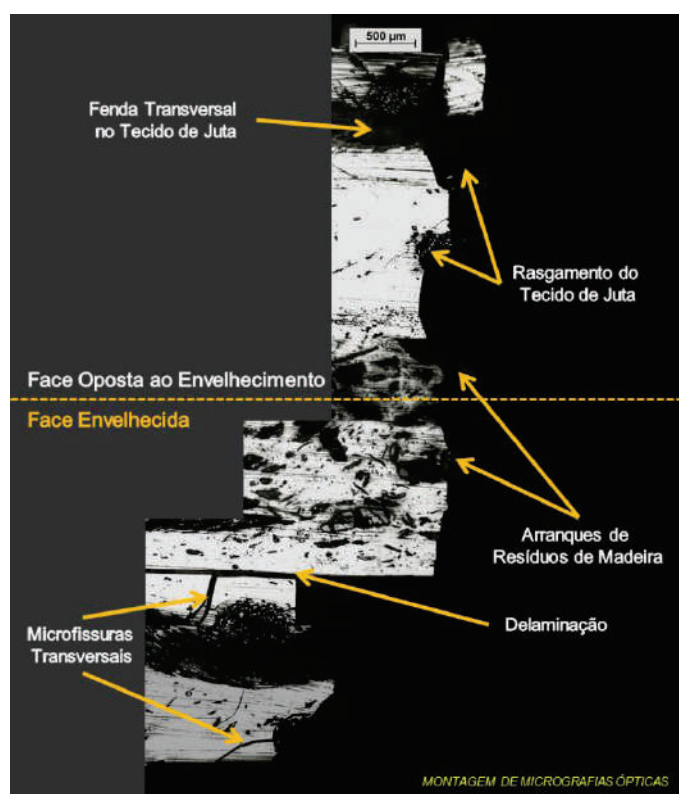


Figura 6.29. Paineis **BMJ-E** - Fratura final na tração uniaxial.

Através da análise detalhada da região fraturada (fig. 6.30), é possível observar que a região do núcleo é relativamente menos afetada pelo processo de aceleração do envelhecimento.

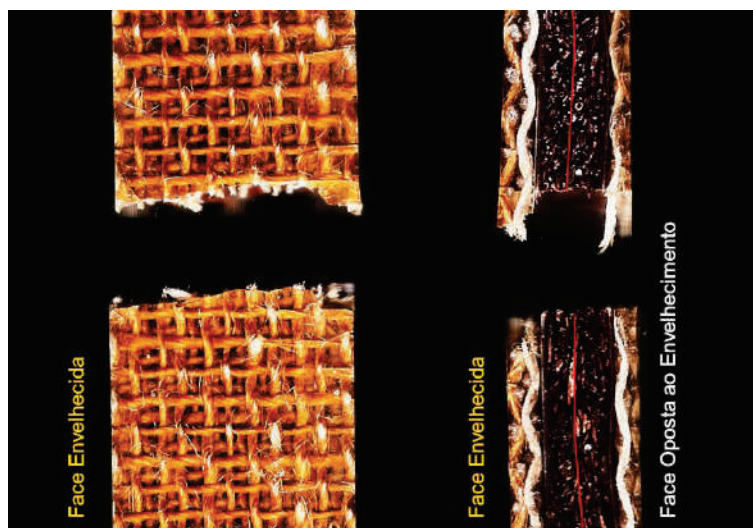


Figura 6.30. Painel **BMJ-E** - Superfície e seção longitudinal (espessura) na tração uniaxial.

Na região do núcleo a fratura final manteve-se frágil e com desenho regular, a mesma forma de dano observada no painel no seu estado original. Tal fato não se repetiu nas camadas de tecido de juta, as quais se mostraram irregulares devido ao rasgamento mecânico dos tecidos decorrentes da desaderência fibra-matriz. Foi observado também o processo de delaminação na interface entre o núcleo de resíduos de madeira e a camada de tecido de juta. Ressalta-se que o núcleo aparentemente manteve sua estrutura intacta.

A fratura final foi bastante irregular, notadamente na face submetida ao envelhecimento, apresentando microfissuras transversais à aplicação da carga, com a fenda iniciada no tecido bidirecional de juta, mostrado em detalhe na figura 6.31a.



Figura 6.31. Painel **BMJ-E**: a) Fenda originada no tecido de juta na tração uniaxial; b) Microfissura originada na região oposta ao envelhecimento.

O painel envelhecido não apresentou a mesma concentração de danos na região fraturada, característica do painel **BMJ**. Foram observadas várias microfissuras de pequena

extensão tanto originadas a partir da borda da face envelhecida quanto na borda com a face não exposta ao envelhecimento, como ilustra a figura 6.31b.

Na análise da fratura final na seção transversal do CP utilizando a microscopia eletrônica de varredura, observa-se que a estrutura do núcleo manteve-se aparentemente intacta, e já comentada anteriormente, ressaltando apenas que o envelhecimento provocou fragilidade na matriz caracterizada pelo arranque dos resíduos de madeira em pontos isolados, devido à desaderência resíduo/matriz, como visto na figura 6.32.

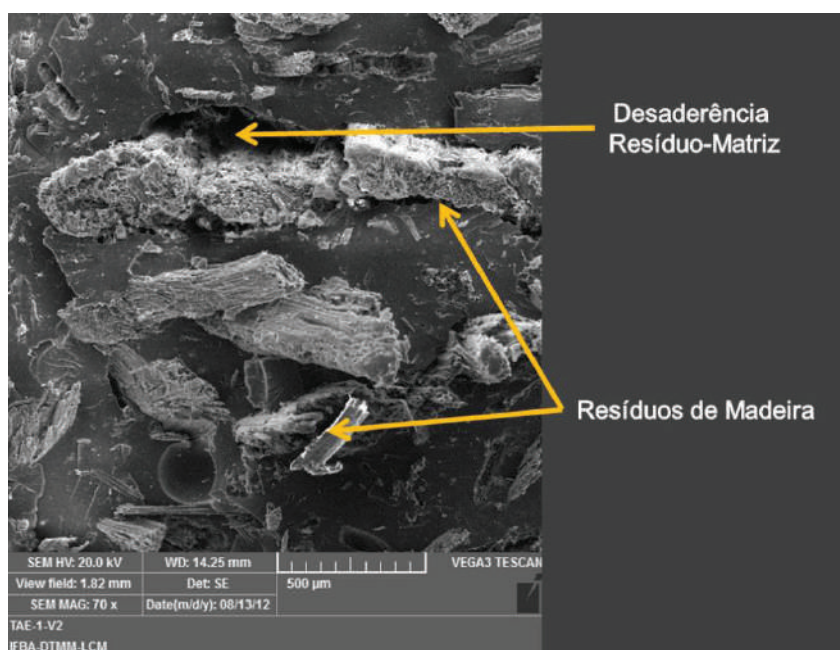


Figura 6.32. Painel **BMJ-E** - Núcleo na região de fratura final na tração uniaxial.

#### 6.2.5. Painel **BMJ-E** – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos

O painel **BMJ-E** iniciou o processo de fratura depois de ultrapassar 20 MPa de tensão, quando é observada irregularidades nas curvas com a formação de picos e quedas até o rompimento final do material. Para essa carga também é observado mudanças na inclinação das curvas ocasionada pela mudança no módulo elástico.

Na figura 6.33 apresenta-se o diagrama de tensão versus deflexão do painel **BMJ-E** obtido no ensaio de flexão em três pontos.



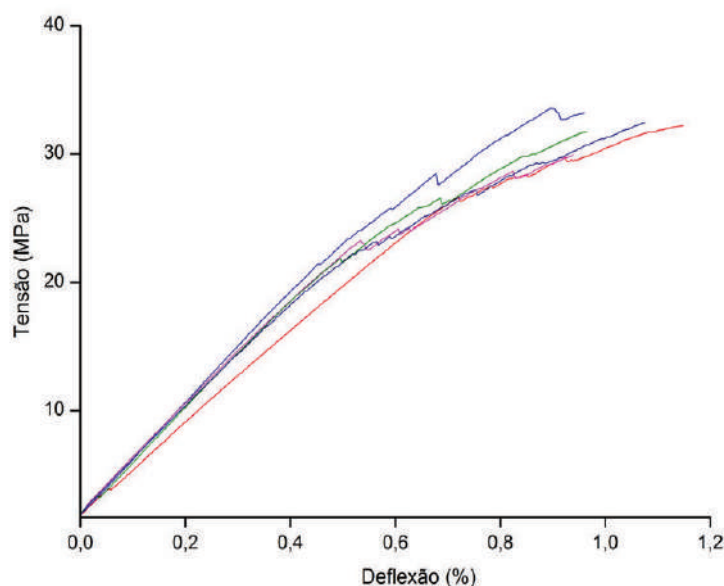


Figura 6.33 Diagrama de tensão versus deflexão do Painel **BMJ-E**.

Os resultados obtidos com os valores médios de tensão máxima (MPa), módulo de elasticidade na flexão (GPa) e da máxima deflexão, com suas respectivas dispersões são apresentados na tabela 6.8. Do mesmo modo que na flexão em três pontos do painel **BMJ** na condição original, o módulo de elasticidade foi medido antes do início do dano e a dispersão é a diferença absoluta dos resultados obtidos, que para esse ensaio apresenta níveis de dispersão menores que os registrados para o ensaio de tração.

Tabela 6.8. Propriedades mecânicas do painel **BMJ-E** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	32,38	2,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,03	7,4
Deflexão Máxima (%)	1,03	10,6

Como observado na tabela acima, o painel envelhecido repetiu na flexão o moderado aumento da dispersão, já comentado no ensaio de tração uniaxial. O painel em estado original já havia apresentado maior dispersão que o laminado **BJ** em estado original.

#### 6.2.6. Análise da Fratura do Painel **BMJ-E** na Flexão em Três Pontos

Mostra-se na figura 6.34 a seção longitudinal do painel **BMJ-E** após ensaio de flexão em três pontos, onde se observa a presença de fissuras na camada tracionada.



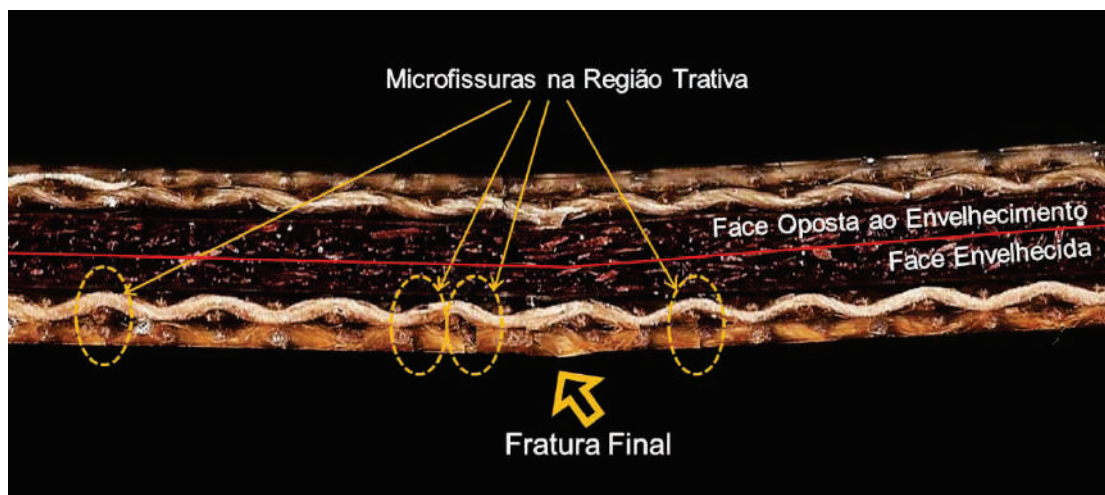


Figura 6.34. Seção longitudinal (espessura do CP) na flexão em três pontos do painel **BMJ-E**.

A figura 6.35 mostra a formação e propagação da fratura, caracterizada principalmente pela formação e propagação da fenda, desde o início da mesma na face tracionada até as camadas comprimidas, utilizando a microscopia óptica.



Figura 6.35. Fratura final na flexão em três pontos do painel **BMJ-E**.

No ensaio de flexão em três pontos o painel **BMJ-E** apresentou uma maior quantidade de microfissuras ao longo da camada envelhecida, escolhida para ser tracionada neste ensaio. Tanto a análise macroscópica quanto microscópica da fratura mostra que a

mesma se concentra na face tracionada do corpo de prova. Alguns corpos de prova apresentaram fraturas finais semelhantes a do painel **BMJ**, com maior abertura no início e bifurcação final sem atingir a outra extremidade, entretanto a maior parte das amostras apresentou uma fratura com pequena bifurcação no início, seguindo regular ao longo do núcleo, demonstrando, entretanto diversas fissuras ao final da região comprimida.

Na análise da fratura na superfície do corpo de prova utilizando a microscopia eletrônica de varredura (ver figura 6.36), pode ser visualizada toda a formação e propagação da fratura descrita anteriormente com o detalhe da presença de ruptura de fibras internas às camadas tracionadas.

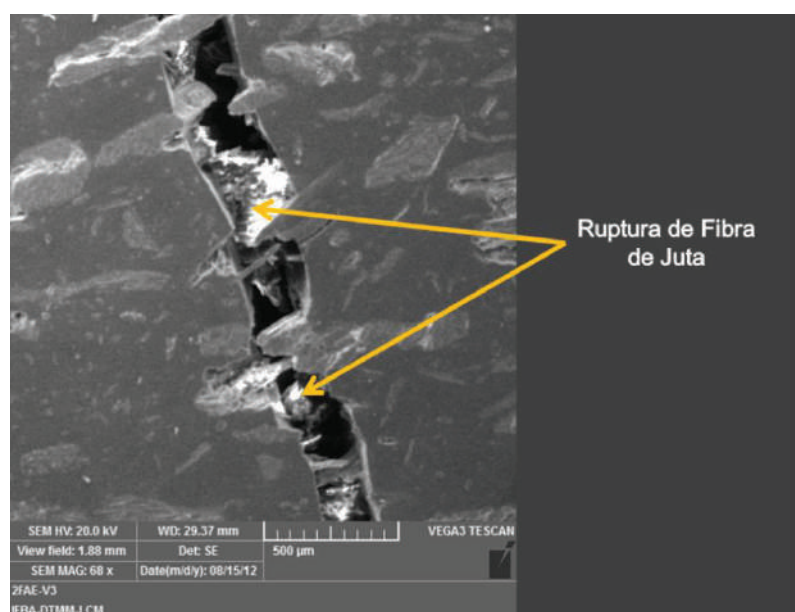


Figura 6.36. Fratura do Painel **BMJ-E** – Detalhe da ruptura de fibras de juta.

### 6.3. Influência do Envelhecimento nas Propriedades do Painel **BMJ-E**

A análise da influência do envelhecimento ambiental acelerado do painel **BMJ** será realizada em duas partes:

Primeiro, através da observação do perfil das curvas médias de desempenho na tração uniaxial e flexão em três pontos por intermédio do diagrama tensão versus deformação e tensão versus deflexão. As curvas médias foram calculadas através dos valores médios relativos de cinco corpos de prova para cada ensaio;

Segundo, através de gráficos de barras comparativos para verificar a variação (ganho e perda) das propriedades mecânicas: tensão última, tensão máxima, módulos de

elasticidade, percentual de deformação e de deflexão. Como referência será utilizada os dados de desempenho do painel em estado original, já apresentados no tópico 6.1.

### 6.3.1. Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Painel BMJ-E

O estudo comparativo dos perfis tensão versus deformação entre o painel **BMJ** e o painel **BMJ-E** obtidos no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 6.37 através do diagrama das curvas medias calculadas para as respectivas condições de ensaios.

Observa-se nesse estudo que o processo de envelhecimento ambiental afeta o comportamento tensão versus deformação do painel, tendo em vista linearidade observada entre esses parâmetros até a fratura final para o caso do **BMJ-E**. Comportamento semelhante foi obtido para o caso do laminado **BJ**.

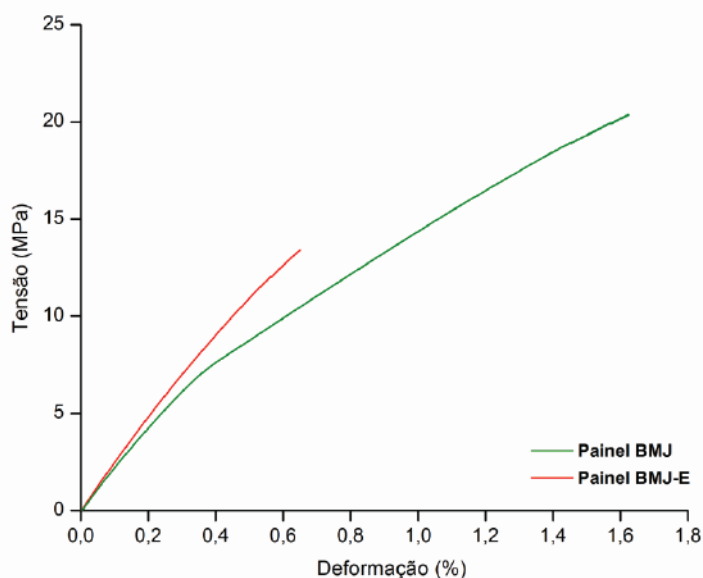


Figura 6.37. Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painel **BMJ** x Painel **BMJ-E** na tração uniaxial.

Registra-se também que o painel **BMJ** quando afetado pelos fatores climáticos adotados no teste de envelhecimento acelerado perde, assim como verificado no laminado **BJ-E** (capítulo 5), grande parte das propriedades no ensaio de tração. O módulo após envelhecimento é beneficiado pelo aumento da rigidez do reforço empregado no material, entretanto há significativa perda de tensão última e na deformação de ruptura.

As perdas e/ou ganhos registrados nas propriedades mecânicas (integridade estrutural) do painel como tensão última, no módulo de elasticidade e no percentual de

deformação pós-ensaio de tração uniaxial do painel **BMJ-E** podem ser observados nos comparativos das figuras 6.38, 6.39 e 6.40 respectivamente.

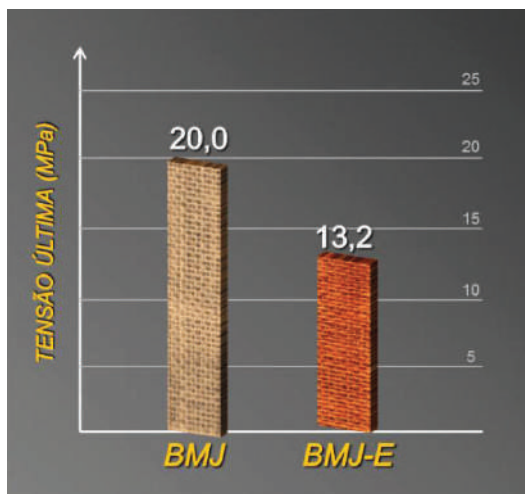


Figura 6.38. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-E** na tensão última.

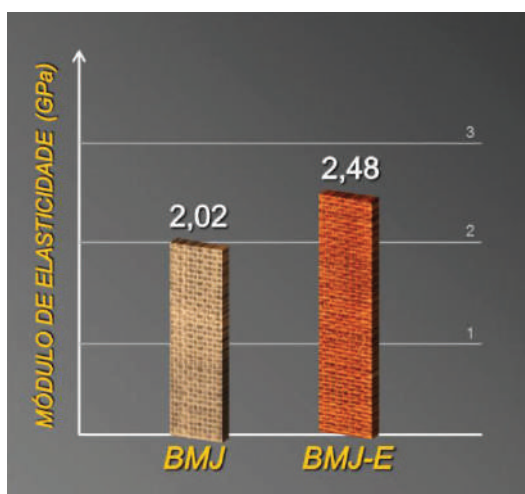


Figura 6.39. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-E** no módulo de elasticidade.

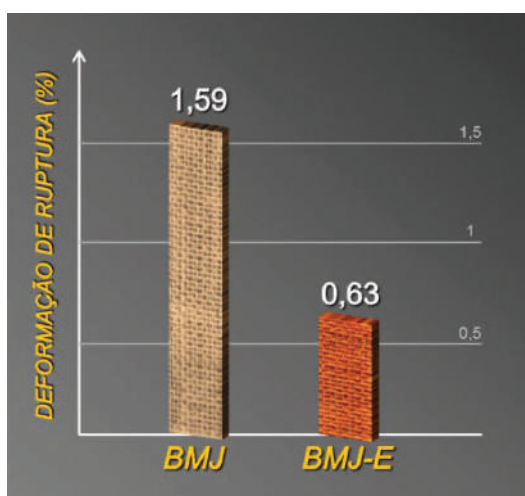


Figura 6.40. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-E** na deformação de ruptura.

Essa perda e/ou ganho em termos percentuais pode ser vista na tabela 6.9 onde se observa, de forma mais clara, o ganho na rigidez do painel e a grande perda em sua resistência à tração.

Tabela 6.9. Variação de propriedades mecânicas do painel **BMJ-E** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Painel BMJ	Painel BMJ-E	VARIAÇÃO (%)
Tensão Última (MPa)	20,0	13,2	- 34,0%
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,02	2,48	+ 18,5%
Deformação de Ruptura (%)	1,59	0,63	- 60,3%

Nos comparativos, as variações de tensão e a melhora do módulo, não esperada para biocompósitos, porém comum em compósitos com reforço sintético, se mantiveram próximos aos registrados por diversos outros trabalhos: Seldén *et al.* (2004), Abdullah-al-Kafi *et al.* (2006), Le Duigou *et al.* (2009), Rodrigues *et al.* (2012) e Santos F. (2012), para citar alguns estudos com maior proximidade de contexto ao presente trabalho. Ressalta-se aqui que a grande diferença registrada na deformação de ruptura se deve em grande parte à perda na resistência apresentada pelo material.

### 6.3.2. Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Painel BMJ-E

O diagrama comparativo das curvas médias de tensão versus deflexão entre o painel **BMJ** e o painel **BMJ-E** para o ensaio de flexão em três pontos é apresentado na figura 6.41.

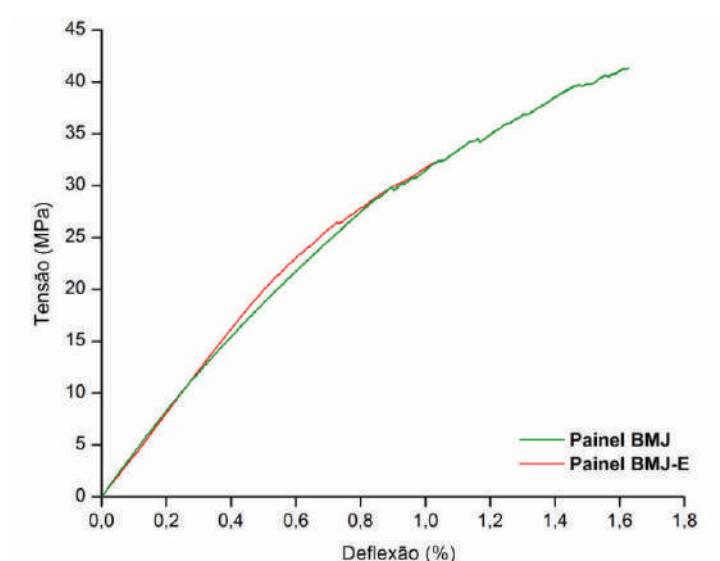


Figura 6.41. Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: Painel **BMJ** x Painel **BMJ-E** na flexão em três pontos.



Quando comparadas as duas curvas médias é observado que ambos os comportamentos são similares, enquanto o painel no estado original segue mantendo sua estrutura mesmo iniciado o processo de dano até romper acima dos 40 MPa de tensão máxima, o painel **BMJ-E** o acompanha rompendo pouco depois de iniciado o dano no material. É observado que os dois biocompósitos iniciam por volta de 25 MPa a formação de fissuras que levam ao rompimento final.

A influência do processo de envelhecimento na tensão máxima, no módulo de elasticidade e no percentual de deflexão pós-ensaio de flexão em três pontos do painel **BMJ-E** podem ser mais bem observada nos comparativos das figuras 6.42, 6.43 e 6.44, respectivamente.

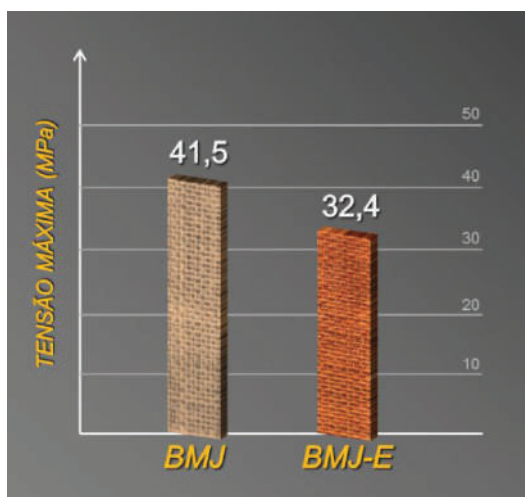


Figura 6.42. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-E** na tensão máxima.

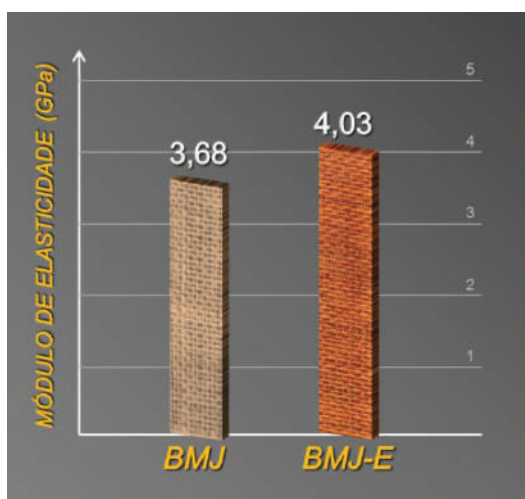


Figura 6.43. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-E** no módulo de elasticidade (flexão).

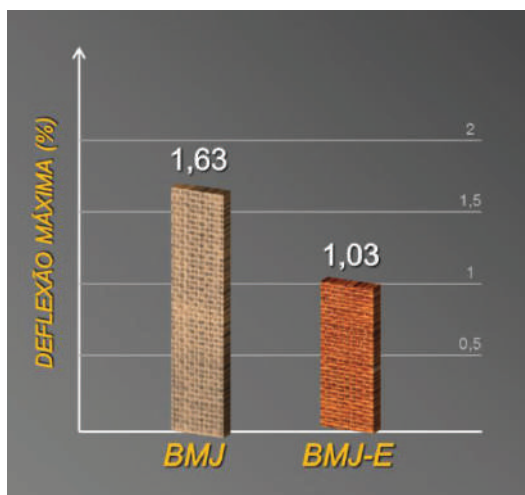


Figura 6.44. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-E** na deflexão máxima.

O painel **BMJ-E** apresentou comportamentos distintos nos dois ensaios verificados. O contraponto ocorreu na flexão, neste ensaio o desempenho do painel envelhecido ofereceu maior retenção de propriedades, ou seja, maior vida útil com menor degradação. O painel também teve sutil melhora em seu módulo na flexão, com resultado quase 10% superior ao material não envelhecido, como pode ser visto na tabela 6.10.

Tabela 6.10. Variação de propriedades mecânicas do painel **BMJ-E** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Painel BMJ	Painel BMJ-E	VARIAÇÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	41,5	32,4	- 21,9%
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,68	4,03	+ 9,5%
Deflexão Máxima (%)	1,63	1,03	- 36,8%

## 6.4. Painel **BMJ-U**

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões referentes painel **BMJ** no estado de saturação obtido após imersão nos meios de água destilada e água do mar. O desempenho mecânico foi estudado apenas para a condição pós-saturado no meio de maior absorção, ou seja, em água destilada.

### 6.4.1 Absorção de Umidade do Painel **BMJ-U**

As fibras naturais, quando em contato com ambientes úmidos, tem uma grande capacidade de absorver água devido à presença de celulose em sua constituição. Em contra

partida a resina de poliéster insaturada com Neopentil Glicol (**RN+NPG**), se caracteriza por possuir polímeros com pesos moleculares altos e assim resultarem em um material de limitada sensibilidade à água.

A literatura referente aos estudos envolvendo absorção de umidade em compósitos poliméricos aponta que em média o tempo de saturação de umidade desses materiais seria de 02 a 03 meses (Oliveira, 2007) (Aquino, 1996), porém para compósitos com fibras naturais esse tempo se mostra muito mais longo.

Além da presença das fibras naturais, o painel **BMJ-U** possui mais um constituinte com propriedades linocelulósicas que é o caso dos resíduos de madeira (Silva, 2008). Nesse sentido, o resultado esperado é de um teor de absorção relativamente alto quando comparado ao teor de absorção envolvendo compósitos, sejam reforçados unicamente com fibras naturais ou compósitos híbridos envolvendo fibras naturais e sintéticas, (Oliveira, 2007).

#### 6.4.2 Painel **BMJ-U** – Absorção de Umidade Utilizando Água Destilada

A figura 6.45 mostra o comportamento da absorção de umidade do painel **BMJ-U** durante 08 meses de imersão em água destilada, tempo necessário para que o estado de saturação fosse atingido. O mesmo foi alcançado com incremento no peso total de 4,14%.

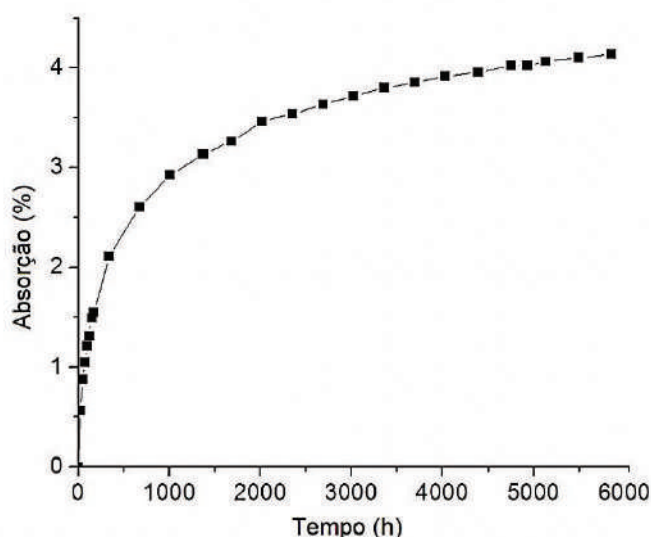


Figura 6.45 Painel **BMJ-U** - Absorção de umidade com água destilada.

O percentual maior de absorção ocorreu nos dois primeiros meses de ensaio. Somente na primeira semana a absorção foi de 1,55% correspondendo a 37,44% da

absorção total. Os valores médios determinados em todos os ensaios de absorção correspondem às medidas de 03 corpos de prova conforme norma técnica.

Alguns trabalhos na área mostram que compósitos reforçados unicamente com fibras naturais absorvem em geral uma porcentagem superior. Dantas (2011) estudou um compósito com cinco camadas de tecido bidirecional de fibra de juta como reforço e resina poliéster tereftálica como matriz, que alcançou uma absorção de 5,53% do peso total. Já o mesmo estudo realizado em compósitos híbridos com tecidos bidirecionais de fibra de vidro e juta (três camadas de juta com duas camadas bidirecional de fibra de vidro) com a mesma resina poliéster tereftálica como matriz, demonstrando a ocorrência de uma absorção de 2,48%.

Oliveira (2007) ao ensaiar um laminado híbrido com tecidos bidirecionais de fibra de vidro e juta, porém com apenas duas camadas de juta e quatro camadas de fibra de vidro, absorveu 4,04%, usando como matriz a resina poliéster ortoftálica. Pode-se perceber que uma absorção de 4,14% apesar de ser superior a absorção dos compósitos híbridos (que utilizam fibra sintética), apresentou uma absorção inferior aos contendo só fibra natural, mostrando que a resina náutica influencia de forma direta na absorção de umidade.

#### 6.4.3 Painel BMJ-U – Absorção de Umidade Utilizando Água do Mar

A figura 6.46 apresenta o comportamento da absorção de umidade do painel **BMJ-U** durante 08 meses de imersão em água do mar.

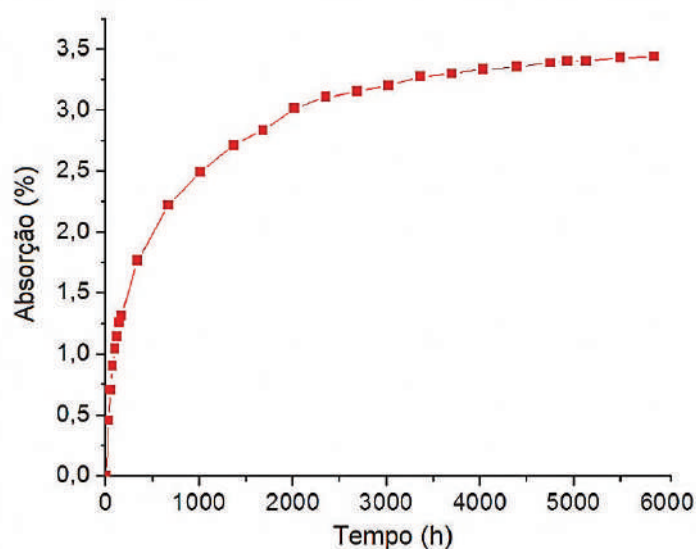


Figura 6.46 Painel **BMJ-U** - Absorção de umidade com água do mar.

A imersão na água do mar resultou num incremento no peso de 3,44% do peso total. Percebe-se também que o percentual maior de absorção foi nos dois primeiros meses de imersão, na primeira semana a porcentagem de absorção foi de 1,31% correspondendo a 38,08% da absorção total.

#### 6.4.4 Painei BMJ-U – Comparativo entre Absorção (Água Destilada x Água do Mar)

A figura 6.47 exibe o comportamento da absorção de umidade do painei **BMJ-U** nos dois meios de imersão testados. Pode-se perceber que depois de alcançado o estado de saturação a água destilada apresentou uma absorção 16,91% superior a da água do mar.

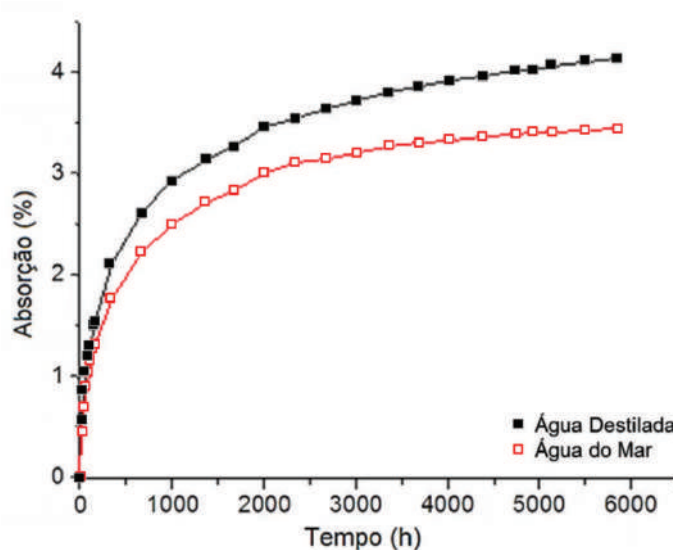


Figura 6.47. Painei **BMJ-U** - comparativo de absorção de umidade.

Percebe-se também que o percentual maior na diferença da absorção foi na saturação, ou seja, na primeira semana a água destilada teve uma absorção superior de 15,48%. Este fato já havia sido observado em trabalho de Barros (2006), que ao estudar dois compósitos reforçados com fibra de vidro, sendo um híbrido reforçado com fibras de curauá, verificou que em ambos os casos a imersão na água destilada proporcionou maior absorção de umidade e, conseqüentemente, uma maior perda nas propriedades mecânicas do laminado híbrido.

A grande diferença de absorção entre os meios testados justifica a sequência de ensaios mecânicos de tração uniaxial e flexão em três pontos, para o painei saturado apenas em imersão na água destilada, já que o objetivo do estudo é verificar os meios e condições mais degradantes do material, para assim ser possível determinar as melhores condições de utilização industrial do biocompósito.



#### 6.4.5 Painei BMJ-U – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial - Água Destilada

Na figura 6.48 mostra-se o diagrama de tensão versus deformação do painei **BMJ-U** obtido no ensaio de tração uniaxial.

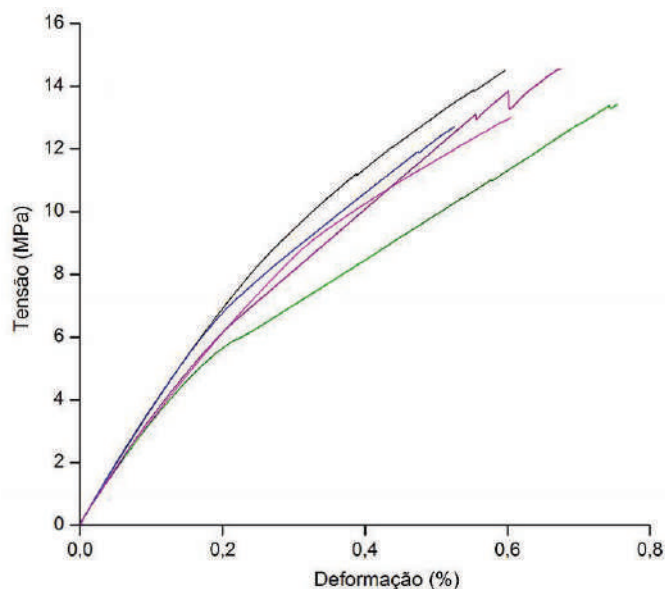


Figura 6.48. Diagrama de tensão versus deformação do Painei **BMJ-U** na tração uniaxial.

No comportamento tensão versus deformação do painei no estado saturado em água destilada, observa-se uma perceptível mudança de módulo, antes de se atingir a metade da tensão última do material, com visível elevação da dispersão quando iniciado do processo de fratura. O módulo foi calculado antes da carga de início do dano, ou seja, cerca de 6,0 MPa, trecho onde o diagrama mostra-se linear, seguindo a Lei de Hooke.

Na tabela 6.11 mostram-se os resultados obtidos com os valores médios de tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa) e deformação de ruptura (%); além dos valores de suas respectivas dispersões percentuais. Os níveis de dispersão encontrados mostram-se semelhante aos obtidos nos demais ensaios realizados para o painei **BMJ**, concretizando um comportamento peculiar aos compósitos à base unicamente de reforços naturais.

Tabela 6.11. Propriedades mecânicas do painei **BMJ-U** saturado em água destilada na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	13,63	6,7
Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)	3,17	11,9
Deformação de Ruptura (%)	0,62	8,0

#### 6.4.6 Análise da Fratura do Painel BMJ-U na Tração Uniaxial – Água Destilada

Na figura 6.49 apresenta-se o modo de fratura final do painel **BMJ-U**, que se apresentou localizada e do tipo **LGM** (ASTM D 3039-08), assim como a observada no painel **BMJ** e **BMJ-E**.

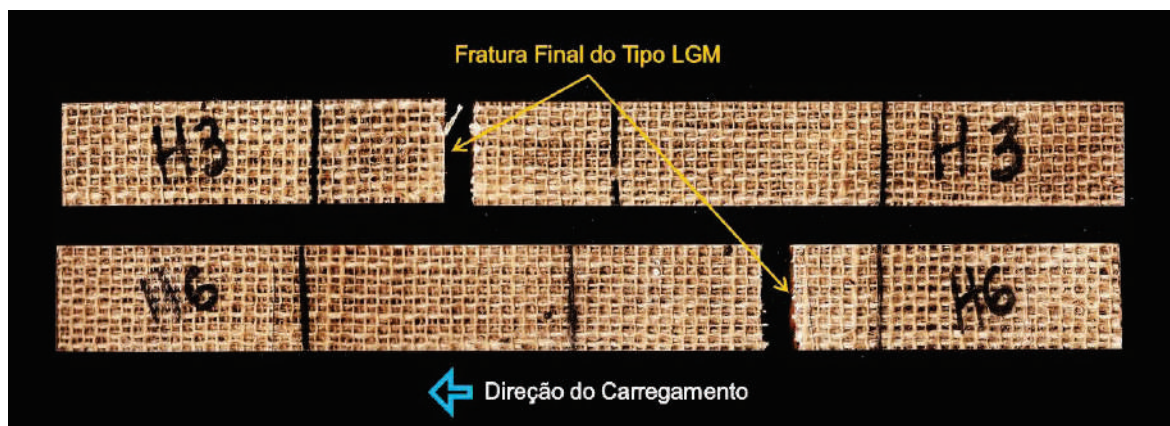


Figura 6.49. Painel **BMJ-U** (água destilada) - Corpos de prova na tração uniaxial.



Figura 6.50. Painel **BMJ-U** - Fratura final na tração uniaxial.

O estado de saturação em água destilada tornou o painel **BMJ-U** susceptível a formação de danos, como: microfissuras transversais e fendas no tecido de juta e arranque

de resíduos de madeira. A fratura final apresentou um desenho mais regular do que a observada nas demais condições de envelhecimento para o painel.

Na figura 6.50, a seguir, é observada a micrografia óptica da seção transversal da região de fratura final na tração uniaxial do painel **BMJ-U**. Em toda a extensão dos corpos de prova e não somente em regiões próximas a fratura final foi observada, a separação dos filamentos dentro da mecha do tecido de juta, sem a ocorrência de microfissuras ou fendas próximas que pudessem a ela estar associadas. Este fenômeno pode referir-se à absorção de umidade ocorrida anteriormente ao ensaio mecânico (fig. 6.51).

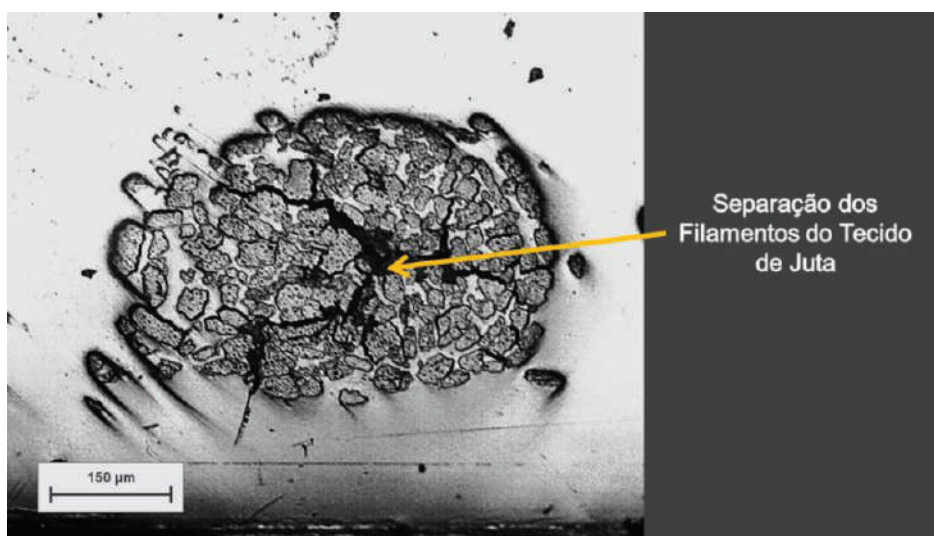


Figura 6.51. Painel **BMJ-U** (água destilada) – Dano interno na mecha do tecido de juta.

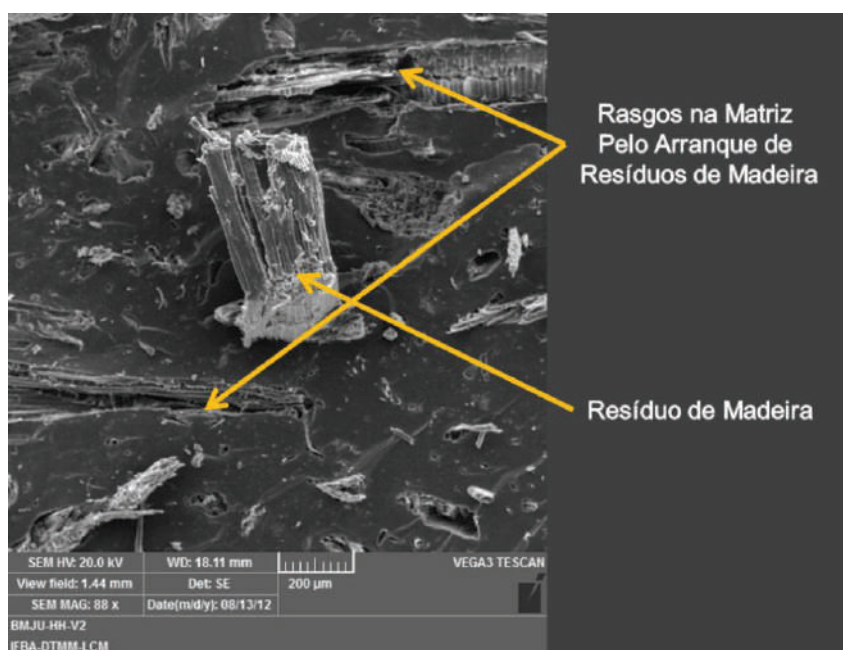


Figura 6.52. Painel **BMJ-U** - Núcleo na tração uniaxial.

Os corpos de prova imersos em água destilada apresentaram um processo de delaminação interna, ou seja, sem atingir a superfície. O descolamento provocou não apenas a separação entre camadas, mas facilitou o arranque de resíduos de madeira no interior do núcleo, demonstrado pelos rasgos na matriz percebidos na figura 6.52.

#### 6.4.7. Paineis BMJ-U - Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos - Água Destilada

No estado de saturação de umidade o painel apresenta-se com a mesma fratura frágil característica do painel no estado originário **BMJ**, com uma maior dispersão no módulo de elasticidade, iniciando seu processo de fratura (picos nas curvas tensão versus deflexão) em torno dos 20 MPa e com quase 1% de deflexão.

Na figura 6.53 apresenta-se o diagrama de tensão versus deflexão do painel **BMJ-U** saturado na água destilada obtido no ensaio de flexão em três pontos.

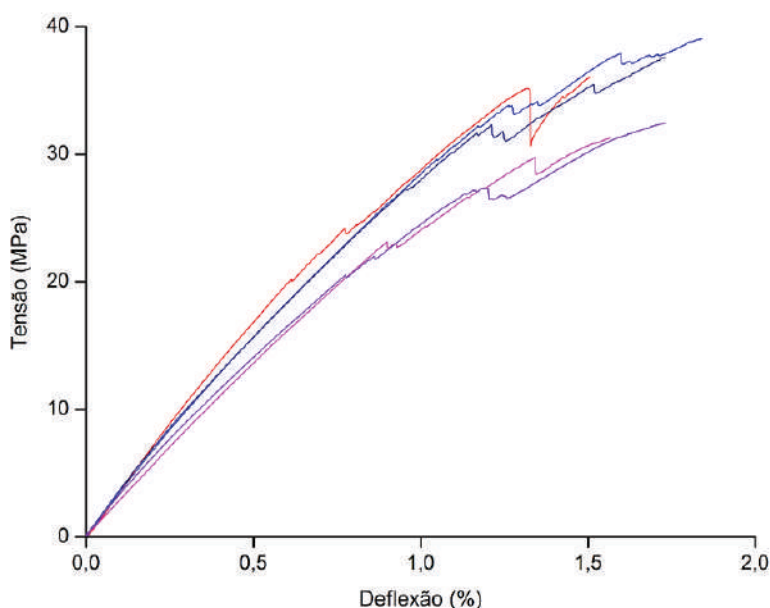


Figura 6.53. Diagrama de tensão versus deflexão do Paineis **BMJ-U** (água destilada).

Os resultados obtidos com os valores médios de tensão máxima (MPa), módulo de elasticidade na flexão (GPa) e da deflexão máxima, com suas respectivas dispersões são apresentados na tabela 5.12.

Tabela 6.12. Propriedades mecânicas do painel **BMJ-U** saturado em água destilada na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	35,30	10,6
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,92	13,6
Deflexão Máxima (%)	1,67	10,1

Observou-se que, em geral, os níveis de dispersão apresentados pelo painel exposto à água destilada na flexão são um pouco maiores que os obtidos nos ensaios de tração uniaxial para a mesma condição de saturação, principalmente no que se refere à tensão máxima.

#### 6.4.8 Análise da Fratura do Painel **BMJ-U** na Flexão em Três Pontos - Água Destilada

Um maior número de fissuras se apresentou macroscopicamente na região tracionada do painel **BMJ-U**, quando comparada ao painel **BMJ**, como pode ser visto na figura 6.54.

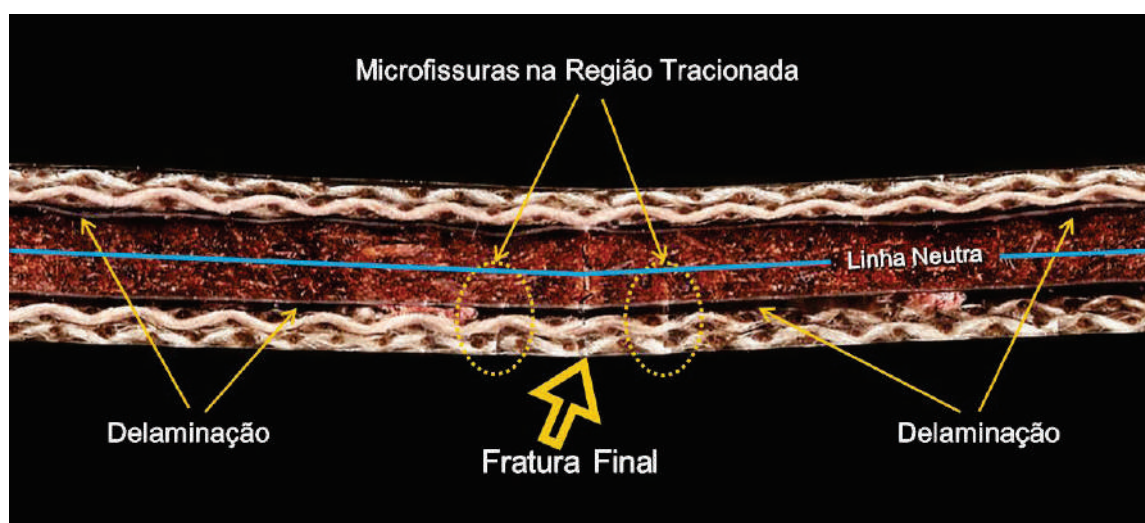


Figura 6.54. Painel **BMJ-U** - Seção longitudinal na flexão em três pontos.

A fratura final na flexão em três pontos do painel **BMJ-U** exibiu uma relativa regularidade com sutis mudanças na região do núcleo. O dano se propagou até a região comprimida, com leve bifurcação após ultrapassar o núcleo, como ilustra a figura 6.55.



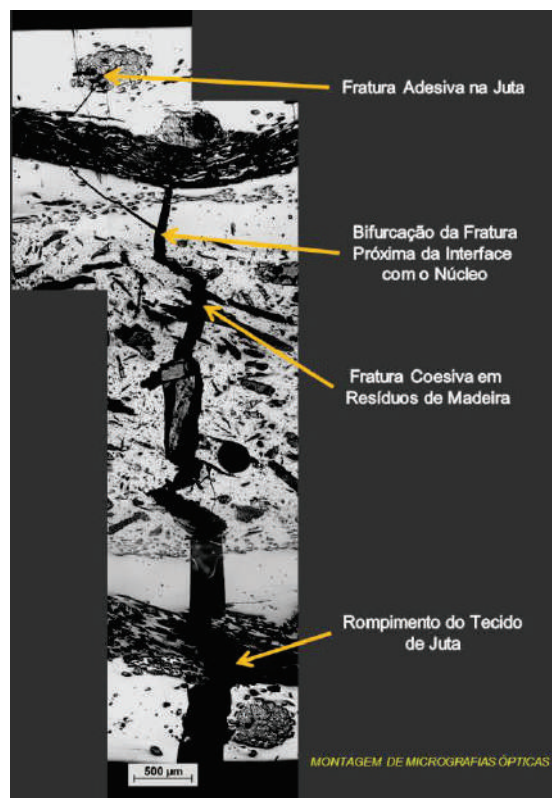


Figura 6.55. Painel **BMJ-U** - Fratura final na flexão em três pontos.

O painel **BMJ-U** apresentou na flexão, em oposição ao seu desempenho na tração uniaxial, um dano mais intenso. A presença da delaminação foi mais intensa quando comparada à do painel **BMJ** (provavelmente influenciada pela imersão no ensaio de absorção) separando as camadas de tecido bidirecional juta do núcleo do material, fragilizando o material. Na análise microscópica da fratura observou-se ainda que na propagação da mesma fossem detectadas presenças de fissuras transversais como as demonstradas nas figuras 6.56 e 6.57.

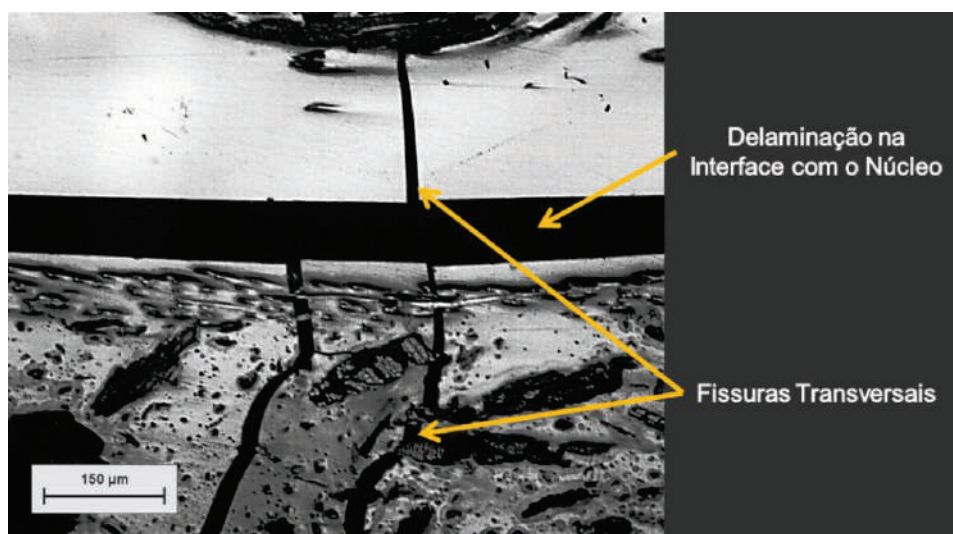


Figura 6.56. Painel **BMJ-U** - Delaminação na interface com o núcleo.

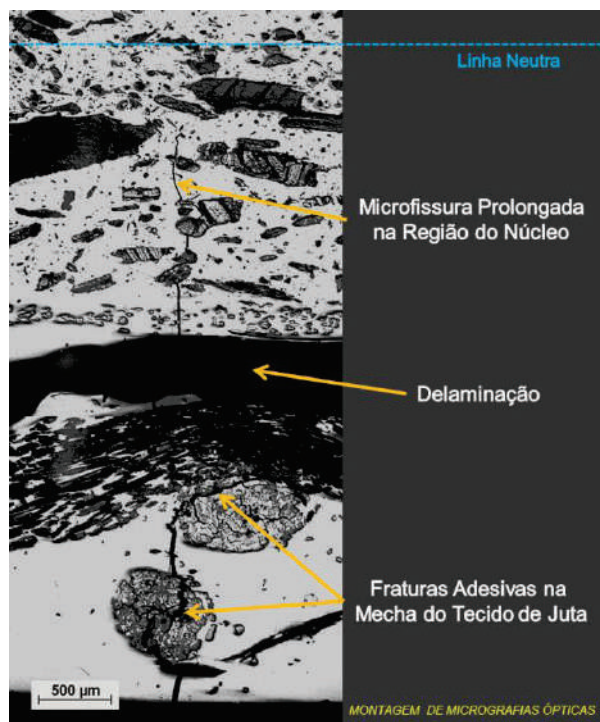


Figura 6.57. Painel **BMJ-U** – Microfissura na flexão em três pontos.

Alguns detalhes na propagação dessas microfissuras no interior do núcleo de resíduos de madeira podem ser observados nas figuras 6.58 e 6.59, como fratura coesiva nos resíduos de madeira e descolamento por desaderência desses resíduos de madeira, respectivamente.

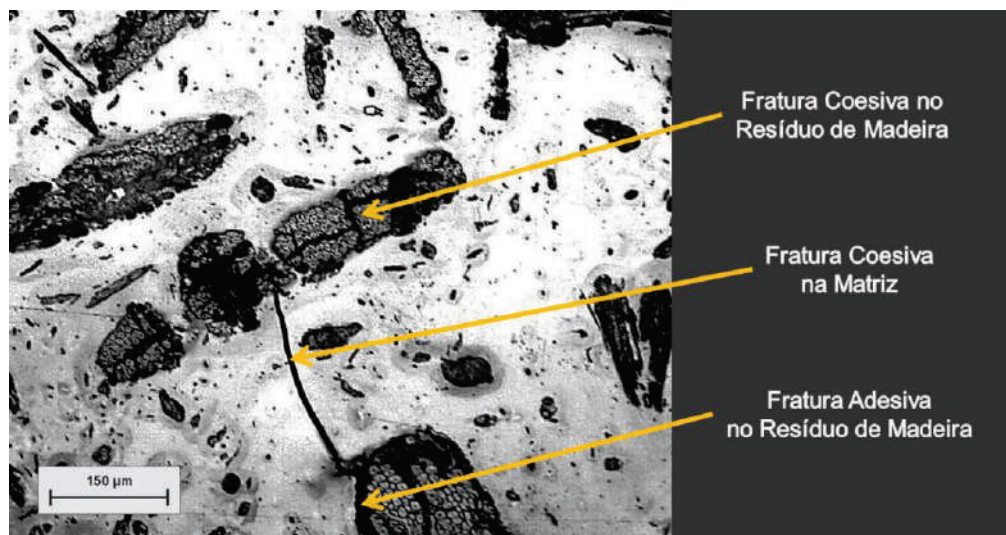


Figura 6.58. Painel **BMJ-U** – Tipos de fraturas presentes na flexão em três pontos.

A presença de microfissuras (tanto no interior do núcleo quanto nas camadas de tecido de fibras de juta), como a delaminação entre as camadas de tecido e o núcleo do

painel originaram fraturas dos tipos coesivas na matriz, quanto adesiva no interior das mechas do tecido de fibras de juta.



Figura 6.59. Painel **BMJ-U** – Desaderência nos resíduos de madeira /resina na flexão em três pontos.

## 6.5. Influência da Absorção de Umidade nas Propriedades Mecânicas do Painel BMJ

A análise da influência da absorção de umidade por saturação do biocompósito na água destilada do painel **BMJ** será realizado em duas partes: primeiro através da observação do perfil das curvas médias de desempenho na tração uniaxial e flexão em três pontos por intermédio do diagrama tensão versus deformação e tensão versus deflexão, respectivamente. Segundo através de gráficos de barras comparativos para verificar a variação (ganho e/ou perda) das propriedades mecânicas: tensão última, tensão máxima, módulos de elasticidade, percentual de deformação e de deflexão.

Como referência será utilizada os dados de desempenho do painel em estado original, já apresentados no tópico 6.1.

### 6.5.1. Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Painel BMJ-U

O painel saturado por umidade na água destilada apresentou um comportamento muito semelhante ao painel envelhecido, com perdas significativas na tensão última e na deformação de ruptura. O diagrama comparativo (curvas médias) de tensão versus deformação entre o painel **BMJ** e o painel **BMJ-U** (saturado em água destilada) determinado no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 6.60.



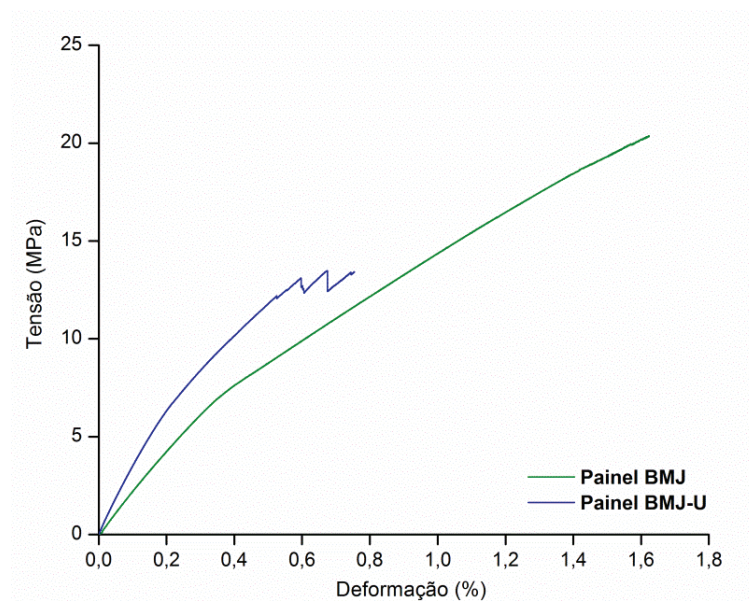


Figura 6.60. Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painel **BMJ** x Painel **BMJ-U** na tração uniaxial.

O módulo do painel úmido foi beneficiado, assim no painel **BMJ-E**, com uma melhora significativa no módulo, de 36% com relação ao painel original. Importante salientar que como os corpos de prova só foram retirados da água na hora do ensaio (norma ASTM D 570 – 98/05), a presença da umidade na sua estrutura, resultou na dilatação da espessura que contribuiu no enrijecimento do material e consequentemente possibilitou a melhora em seu módulo.

O estudo da integridade estrutural do **BMJ** obtidos nos valores de tensão última, no módulo de elasticidade e no percentual de deformação pós-ensaio de tração uniaxial do painel **BMJ** é visto nos comparativos das figuras 6.61, 6.62 e 6.63, respectivamente.

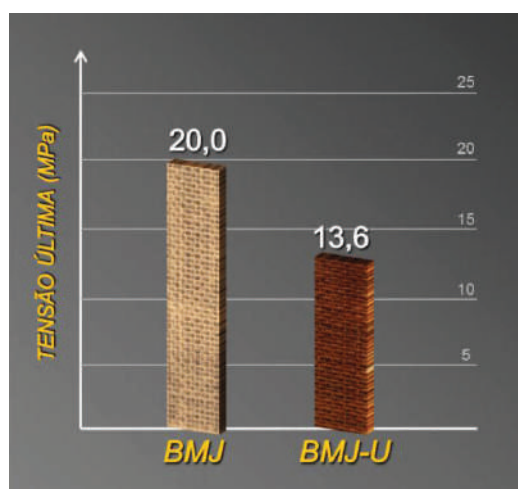


Figura 6.61. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-U** na tensão última.

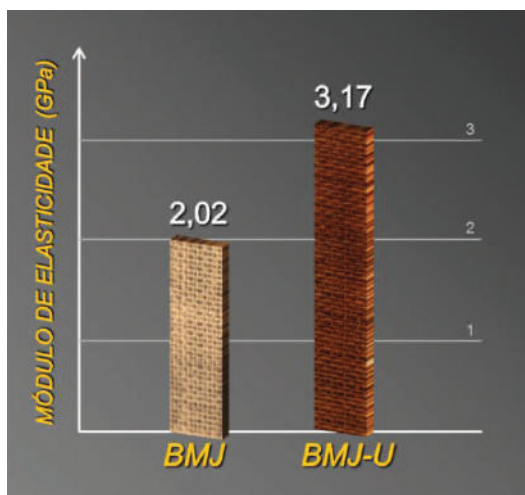


Figura 6.62. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-U** no módulo de elasticidade.

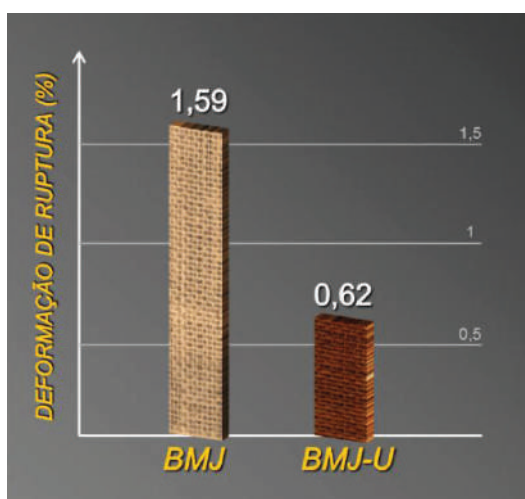


Figura 6.63. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-U** na deformação de ruptura.

O painel **BMJ-U** apresentou, na tração uniaxial, desempenho muito semelhante ao painel envelhecido em termos gerais, especialmente quanto ao módulo e deformação de ruptura, porém houve menor perda na tensão última, como se percebe na tabela 6.13.

Tabela 6.13. Variação de propriedades mecânicas do painel **BMJ-U** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Painel BMJ	Painel BMJ-U	VARIAÇÃO (%)
Tensão Última (MPa)	20,0	13,6	- 32,0%
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,02	3,17	+ 36,28%
Deformação de Ruptura (%)	1,59	0,62	- 61,0%



Quando observado apenas as mudanças ocorridas nas propriedades mecânicas, pode se concluir que na tração uniaxial, a saturação por imersão em água destilada funciona de modo semelhante ao envelhecimento ambiental acelerado utilizado para o painel **BMJ-E**.

### 6.5.2. Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Painel **BMJ-U**

O diagrama comparativo (curvas médias) de tensão versus deflexão entre o painel **BMJ** e o painel **BMJ-U** determinado no ensaio de flexão é apresentado na figura 6.64.

Quando comparadas as duas curvas médias, percebe-se um comportamento diferente ao observado decorrente da influência do envelhecimento acelerado, quanto efeito da saturação de umidade na água destilada para o ensaio de tração uniaxial, na flexão a saturação do painel **BMJ** o degrada bem menos.

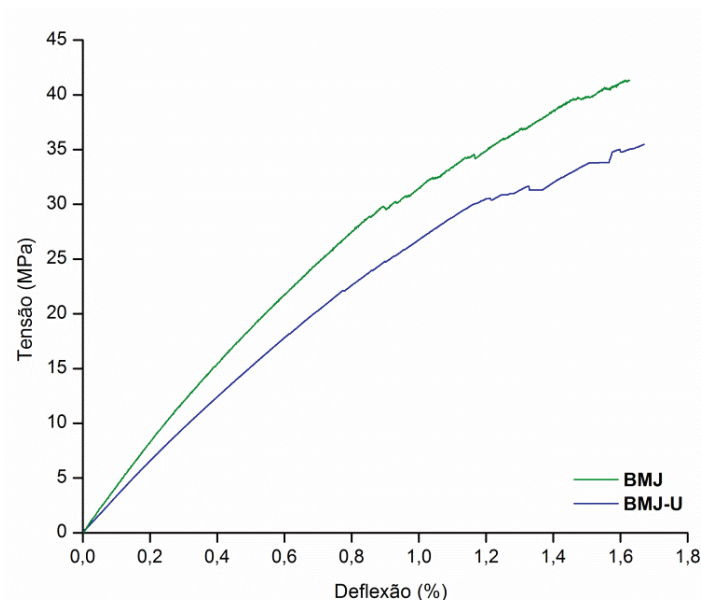


Figura 6.64. Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: Painel **BMJ** x Painel **BMJ-U** na flexão em três pontos.

O painel **BMJ-U** apresentou, na flexão em três pontos perdas tanto na tensão máxima quanto no módulo de elasticidade, diferente do painel **BMJ-E** que mostrou ganho no módulo de elasticidade. Entretanto, o painel **BMJ-U** tem perda menor na tensão máxima, enquanto a deflexão fica quase inalterada.

A variação nos valores de tensão máxima, no módulo de elasticidade e no percentual de deflexão pós-ensaio de flexão em três pontos do painel **BMJ-U** pode ser mais bem observada nos comparativos das figuras 6.65, 6.66 e 6.67 respectivamente.

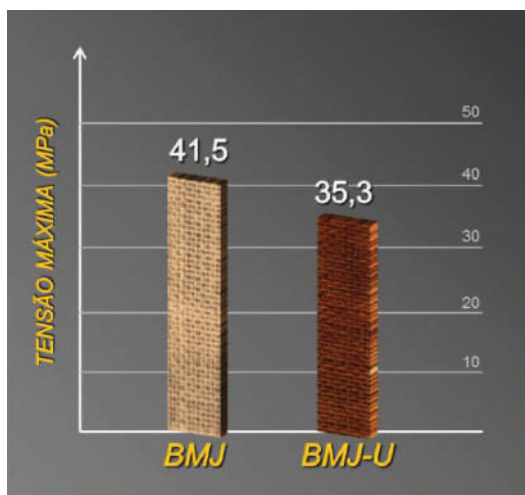


Figura 6.65. Comparativo: Painei **BMJ** x painei **BMJ-U** na tensão máxima.

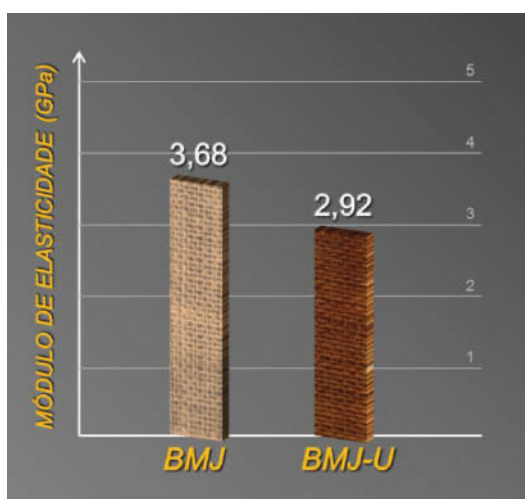


Figura 6.66. Comparativo: Painei **BMJ** x painei **BMJ-U** no módulo de elasticidade (flexão).

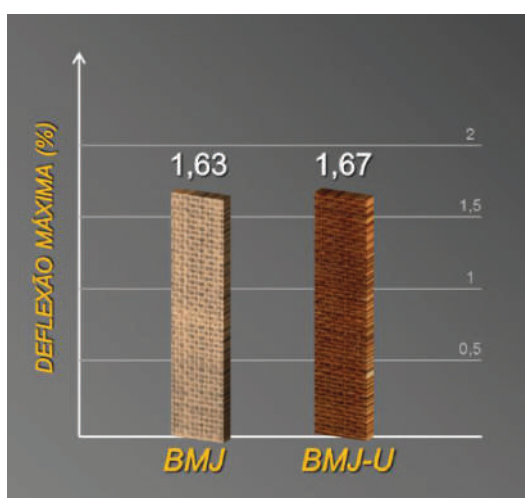


Figura 6.67. Comparativo: Painei **BMJ** x painei **BMJ-U** na deflexão máxima.

A justificativa para as perdas apresentadas na flexão residem parte na característica de cada ensaio. O esforço necessário para o ensaio de tração exige do corpo de prova como

um todo, sobretudo da qualidade de sua interface, já no caso da flexão, o esforço ocorre camada sobre camada, e neste caso a mais externa apresenta fatores de proteção especial para ambientes úmidos, evitando que a característica de absorção natural dos reforços presentes internamente à estrutura prejudique seu desempenho mecânico.

Entretanto as moderadas perdas na flexão (ver tabela 5.14) são aspectos já relatados em outros trabalhos com biocompósitos. Le Duigou *et al.* (2009) já havia observado resultado semelhante na imersão em água do mar.

Tabela 6.14. Variação de propriedades mecânicas do painel **BMJ-U** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Painel BMJ	Painel BMJ-U	VARIAÇÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	41,5	35,3	- 14,9%
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,68	2,92	- 20,6%
Deflexão Máxima (%)	1,63	1,67	+ 2,4%

## CAPÍTULO VII

### 7 PAINEL BMJ-R (RECICLADO) - RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Este capítulo apresentará os aspectos macro e microestruturais do biocompósito painel **BMJ-R** com núcleo reciclado a partir dos reforços envelhecidos do painel **BMJ-E**. Com relação às propriedades físicas, a densidade volumétrica do painel **BMJ-R** é apresentada.

Os desempenhos mecânicos obtidos nos ensaios de tração e compressão uniaxial, e flexão em três pontos, serão analisados a partir dos diagramas tensão versus deformação e tensão versus deflexão, respectivamente.

Os dados sobre as resistências últimas à tração e compressão, tensão máxima na flexão, assim como os módulos de elasticidade serão abordados em tabelas conjuntamente aos diagramas. Ressalta-se que para todos os ensaios realizados, os módulos de elasticidade foram medidos antes da carga de início do dano, uma variável dependente do tipo de carregamento e do biocompósito, de forma a evitar qualquer influência desta nos resultados.

O procedimento utilizado na análise macroscópica da fratura foi à mesma empregada na análise do painel **BMJ** (bem como todos os equipamentos e normatização) e tem como objetivo avaliar o modo da fratura mecânica, sua formação e propagação ao longo do comprimento do corpo de prova.

O mesmo procedimento também foi usado na análise microscópica da fratura, onde a microscopia óptica tem como objetivo de avaliar a formação e propagação do dano em nível da microestrutura, já a microscopia eletrônica de varredura é efetuada na seção transversal do corpo de prova na região da fratura final.

A análise e comparação entre o compósito reciclado e o painel original quanto à fratura mecânica, tal como quanto aos desempenhos mecânicos apresentados e posteriores avaliações serão apresentados ao final deste capítulo.

## 7.1. Painel BMJ-R

Nesta seção serão apresentadas as características e propriedades do painel cujo núcleo foi obtido a partir da utilização dos corpos de prova envelhecidos.

### 7.1.1. Características Microestruturais do Painel BMJ-R

As fibras naturais quando envelhecidas, perdem algumas de suas propriedades mais apreciadas enquanto reforço para compósitos, por exemplo, sua capacidade de resistência a carregamentos externos. No processo, já descrito, de acondicionamento dos resíduos de madeira provenientes do painel **BMJ-E** e da transformação e processamento das camadas envelhecidas de tecido bidirecional de fibras de juta em fibras de juta moídas, foi necessário reduzir ao máximo a presença de resina em pó, proveniente do resultado do processo de moagem.

O desafio de reciclar o painel pós-envelhecimento acelerado, possibilitou a geração de um painel com uma diferença básica na estrutura planejada para este biocompósito. O núcleo passou de uma composição unicamente de resíduos de madeira para uma composição híbrida de resíduos de madeira e fibras de juta, ambos embebidos em resina náutica. Na figura 7.1 apresenta-se a distribuição espacial do novo painel.

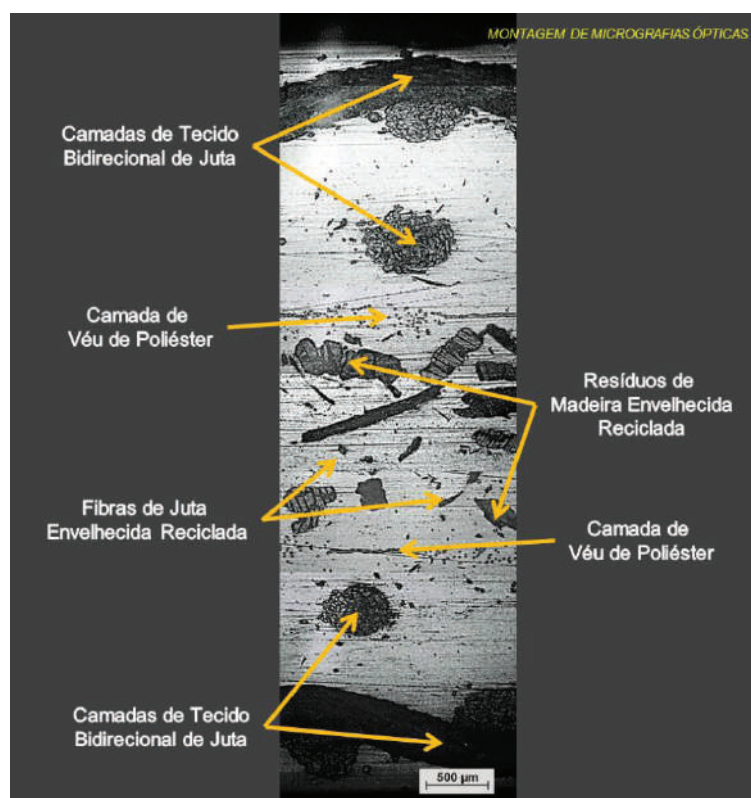


Figura 7.1. Painel **BMJ-R** - Distribuição espacial na seção longitudinal.



Quando observado micrograficamente o núcleo do painel **BMJ-R** parece ter uma menor proporção de reforço do que o apresentado pelo painel original. Trata-se de uma camuflagem que a resina proporciona as fibras de juta, que aparecem como pequenos pontos na região, como melhor observado na figura 7.2 (a e b).



Figura 7.2 Painel **BMJ-R** - Distribuição das fibras de juta no interior do núcleo híbrido.

### 7.1.2. Ensaio de Densidade Volumétrica do Painel BMJ-R

A densidade volumétrica média do painel **BMJ-R** com sua dispersão global está apresentada na tabela 7.1.

Tabela 7.1. Densidade volumétrica média do painel **BMJ-R**.

MATERIAL	VALORES MÉDIOS (g/cm <sup>3</sup> )	DISPERSÃO (%)
Painel BMJ-R	1,16	0,8

A densidade registrada foi pouco menor que a de seu material original (1,18g/cm<sup>3</sup>), em parte devido à substituição de parte dos resíduos de madeira no núcleo por fibras de juta. O resultado em termos de leveza o torna compatível para reaplicação como substituto ao painel **BMJ**.

A medição da densidade volumétrica do painel reciclado é importante, pois permite o cálculo da resistência e módulo de elasticidade específica dos biocompósitos desenvolvidos, permitindo a análise de desempenho em relação à reposição do material originário, além de também servir de parâmetro comparativo com outros materiais não

convencionais, de uso comum e com semelhante tipo de aplicação ao planejada para uso dos painéis **BMJ** e **BMJ-R**.

### 7.1.3. Paineis **BMJ-R** – Desempenho Mecânico na Tração Uniaxial

O diagrama de tensão versus deformação do painel **BMJ-R** resultante no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 7.3.

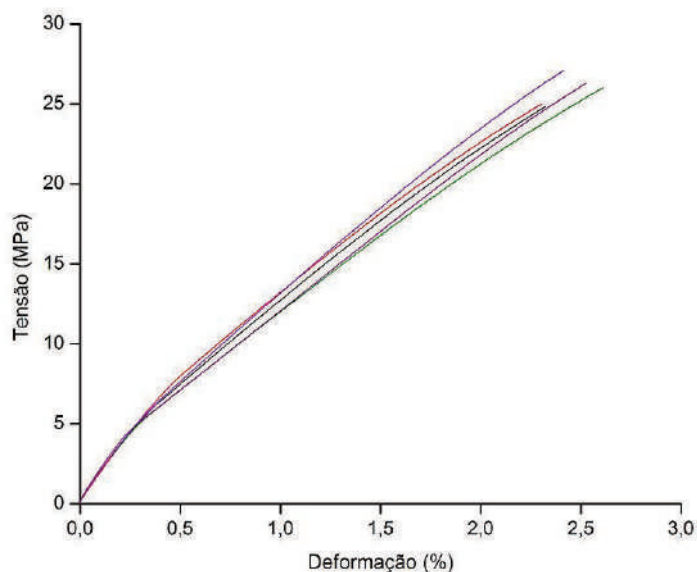


Figura 7.3. Diagrama de tensão versus deformação do Paineis **BMJ-R** na tração uniaxial.

O painel **BMJ-R** demonstrou a mesma fragilidade do painel que o originou, contudo obteve maior resistência e percentual de deformação. A reciclagem melhorou o desempenho do material na tração, comprovado também pela maior uniformidade dos resultados (menor dispersão) principalmente com relação ao módulo de elasticidade, o qual apresentou reduzida dispersão.

Na tabela 7.2 mostram-se os resultados obtidos com os valores médios de tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade longitudinal (GPa) e deformação de ruptura (%); além dos valores de suas respectivas dispersões percentuais.

Tabela 7.2. Propriedades mecânicas do painel **BMJ-R** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	25,85	4,8
Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)	1,81	3,3
Deformação de Ruptura (%)	2,43	7,4

O comportamento bastante uniforme registrado entre a tensão e deformação é confirmado pelos baixos níveis de dispersão encontrados, apesar da natureza híbrida do reforço.

#### 7.1.4. Análise da Fratura do Painel BMJ-R na Tração Uniaxial

O painel **BMJ-R** manteve o mesmo modo de fratura final localizada do tipo LGM (ASTM D 3039-08), já observada tanto para o painel **BMJ** original quanto para as diversas condições de envelhecimento estudadas, ou seja, **BMJ-E** e **BMJ-U** e aqui investigados, ver figura 7.4.

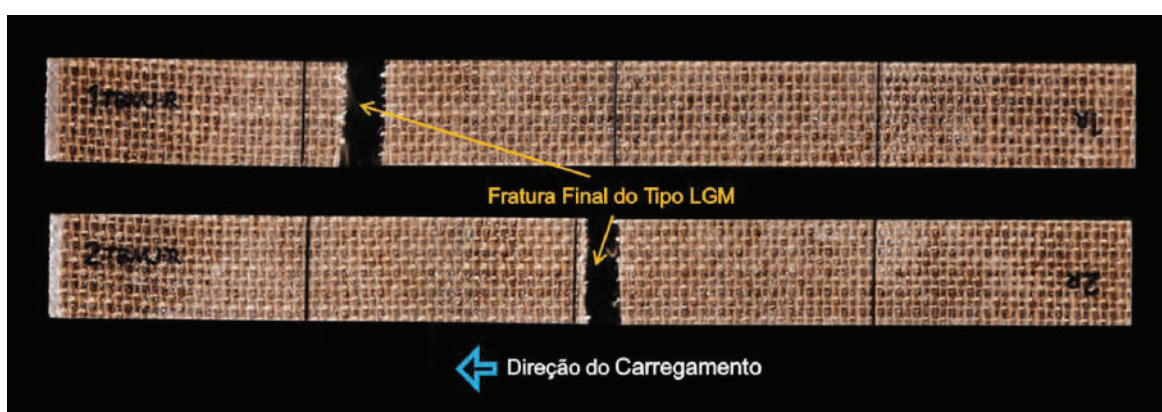


Figura 7.4. Painel **BMJ-R** - Corpos de prova na tração uniaxial.

Na análise macroscópica por meio da figura 7.5 (a e b) é possível visualizar os danos causados ao painel reciclado no ensaio de tração uniaxial, como a presença de fissuras superficiais na matriz. Na seção longitudinal repetiu-se o rasgamento do tecido de juta e o arranque de resíduos de madeira já registrados nas condições anteriormente estudadas.

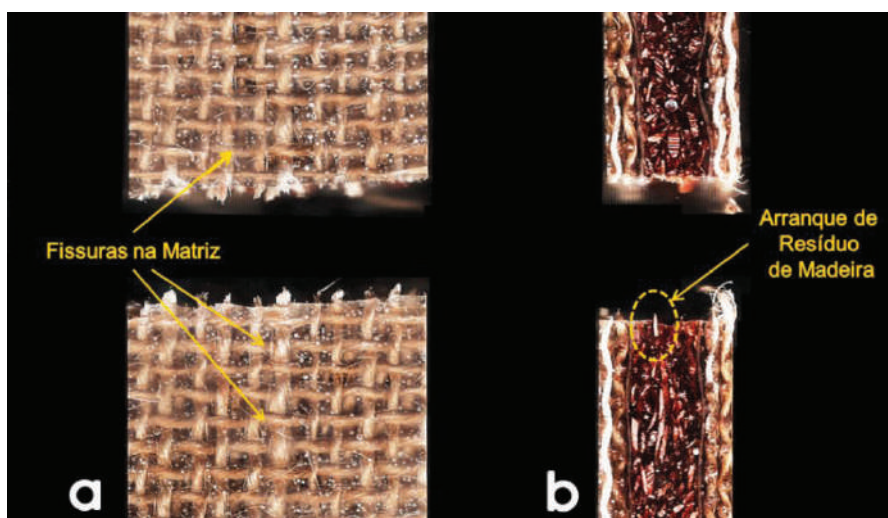


Figura 7.5. Painel **BMJ-R**: a) Face; b) Seção longitudinal na tração uniaxial.

A fratura final do painel **BMJ-R** mostrou-se bastante regular, com reduzida presença dos danos observados nos demais painéis, tais como: microfissuras transversais, fendas e delaminação, como se ilustra na figura 7.6.

A região de fratura final concentra as raras microfissuras observadas ao longo das amostras estudadas.

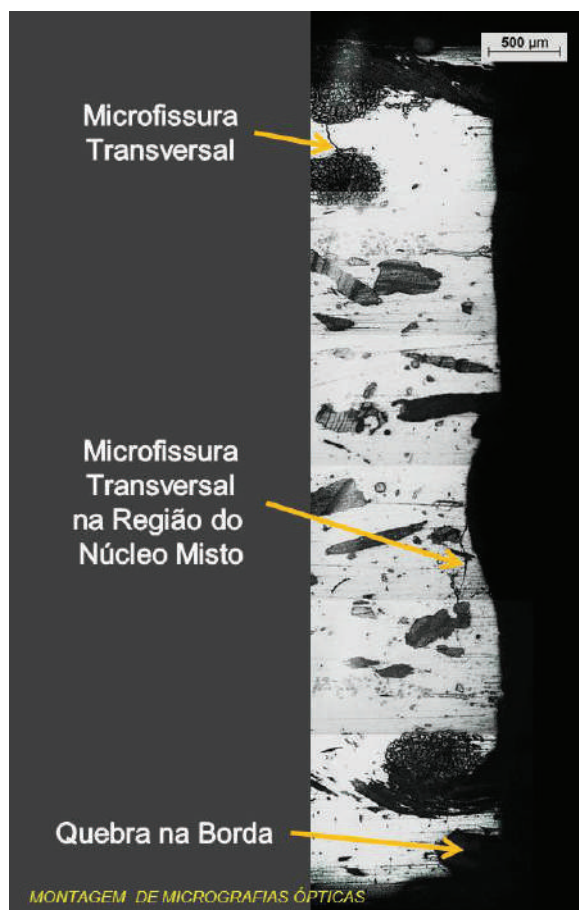


Figura 7.6. Painel **BMJ-R** - Fratura final na tração uniaxial.

#### 7.1.5. Painel BMJ-R – Desempenho Mecânico na Flexão em Três Pontos

Na figura 7.7 segue-se o diagrama de tensão versus deflexão do painel **BMJ-R** no ensaio de flexão em três pontos.

Observa-se que o painel reciclado demonstrou tensão máxima inferior ao painel original e ao envelhecido. A perda também acompanhou o módulo, ainda que na deflexão não tenha havido mudança significativa. O núcleo híbrido parece ter comprometido o desempenho do novo material na flexão, em oposição ao visto na tração.



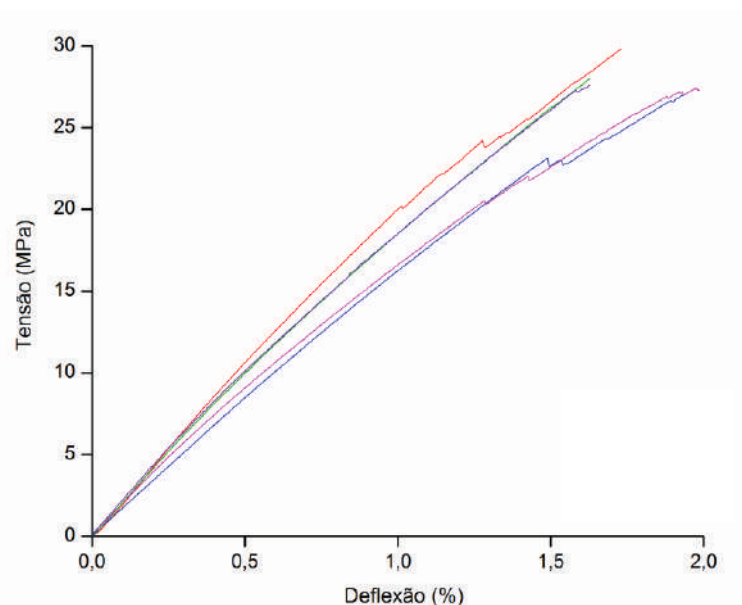


Figura 7.7. Diagrama de tensão versus deflexão do Painel **BMJ-R**.

Os resultados obtidos com os valores médios de tensão máxima na flexão (MPa), módulo de elasticidade na flexão (GPa) e da deflexão máxima, com suas respectivas dispersões é apresentado na tabela 7.3.

Tabela 7.3. Propriedades mecânicas do painel **BMJ-R** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	28,0	6,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,02	8,9
Deflexão Máxima (%)	1,78	11,2

Os valores de dispersão apresentados pelo painel reciclado na flexão em três pontos ficaram pouco acima do painel **BMJ**, em consequência da presença de reforço (fibras de juta e resíduos de madeira) que estiveram expostas a degradação.

#### 7.1.6. Análise da Fratura do Painel **BMJ-R** na Flexão em Três Pontos

Na figura 7.8 é possível visualizar que na seção longitudinal do painel reciclado no ensaio de flexão em três pontos há uma concentração de dano unicamente na região de fratura final. Já a análise micrográfica da fratura mostra um dano mais intenso iniciado na região tracionada do corpo de prova, se propagando até a região comprimida do mesmo.

A fenda iniciada na região tracionada se propaga pelo núcleo, sem significativas irregularidades ou desvios, enquanto que nas camadas de tecido de fibras de juta da região



comprimida, assim como já observado no laminado **BJ** e no painel original, são formadas ramificações, como fica claro na figura 7.9.

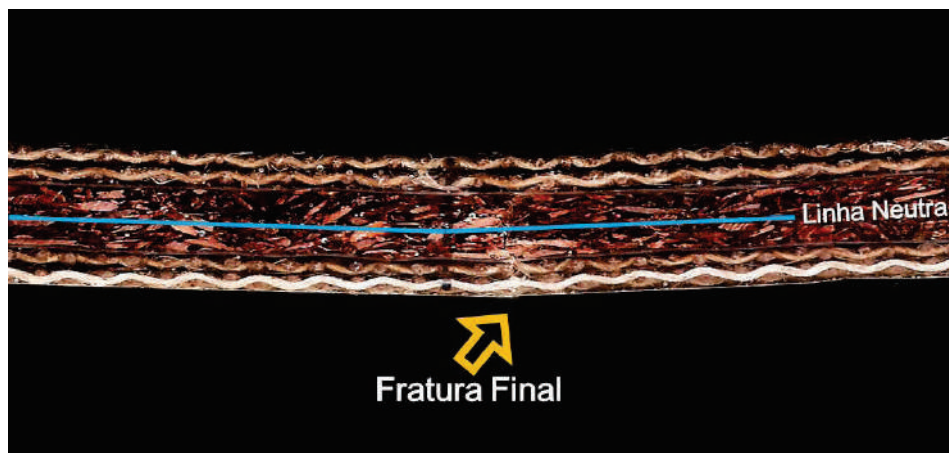


Figura 7.8. Painel **BMJ-R** - Seção longitudinal da região de fratura final na Flexão em três pontos.

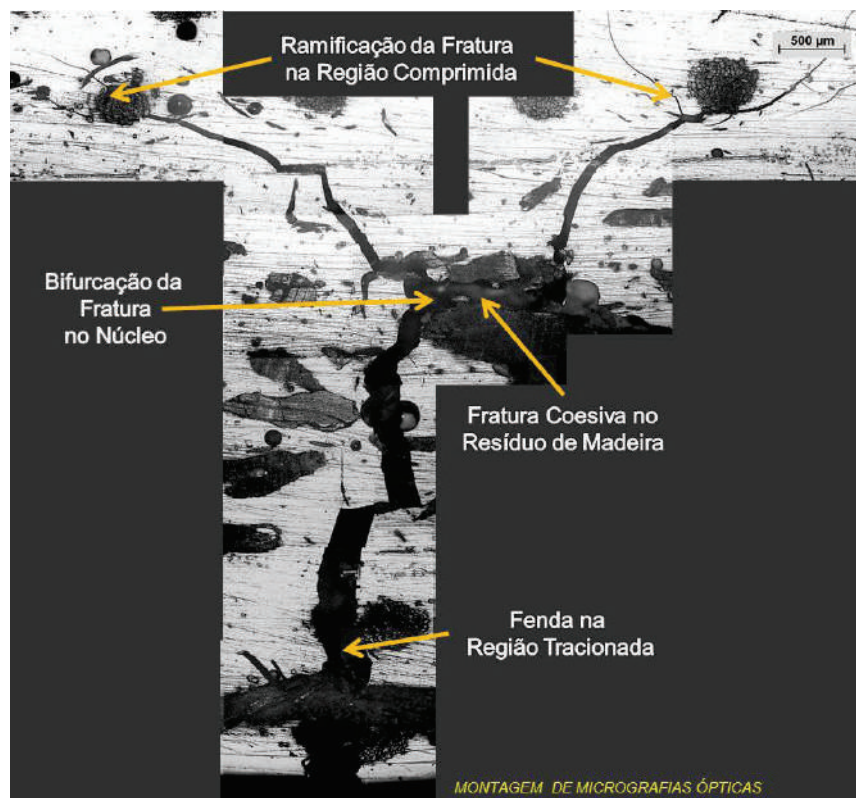


Figura 7.9. Painel **BMJ-R** - Fratura final na flexão em três pontos.

O painel reciclado apresentou uma fratura do tipo frágil com pouca incidência de outros tipos de danos observados em outros carregamentos, a exceção na região do núcleo, onde ocorreram fraturas coesivas em alguns resíduos de madeira como visto na figura 7.9. A concentração de danos na região de fratura final, contudo, demonstrou semelhanças com o comportamento do painel em outros estados (original, envelhecido e úmido), com a

presença de bifurcação com ramificações na região comprimida e rupturas do tecido de juta, como se visualiza na figura 7.10. Em toda a análise não foi observada a presença de delaminação.

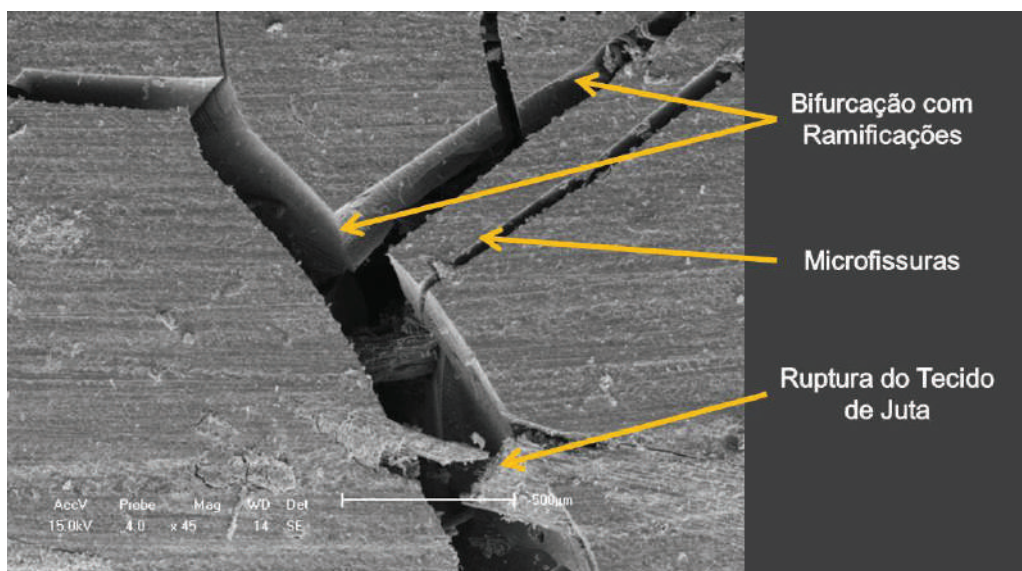


Figura 7.10. Painel **BMJ-R** – Danos na seção transversal na flexão em três pontos.

#### 7.1.7. Painel **BMJ-R** – Desempenho Mecânico na Compressão Uniaxial

Na figura 7.11 é apresentado o diagrama de tensão versus deformação do painel **BMJ-R** obtido no ensaio de compressão uniaxial.

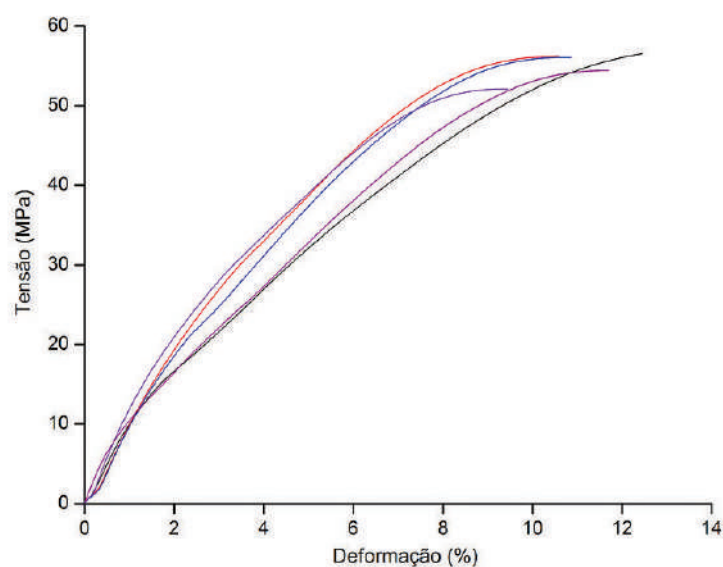


Figura 7.11. Diagrama de tensão versus deformação do Painel **BMJ-R** na compressão uniaxial.

O comportamento tensão versus deformação do painel **BMJ-R** na compressão apresentou um maior grau de dispersão nos resultados quando comparado ao comportamento do mesmo painel frente ao carregamento de tração uniaxial.

Observa-se que o painel reciclado, ao contrário da tração, perdeu capacidade de suporte de carga em relação ao painel original. No entanto manteve suas propriedades de rigidez em termos do módulo de elasticidade e deformação de ruptura.

Os resultados obtidos com os valores médios de tensão última (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e da deformação de ruptura, com suas respectivas dispersões é apresentado na tabela 7.4.

Tabela 7.4. Propriedades mecânicas do painel **BMJ-R** na compressão uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES MÉDIOS	DISPERSÃO (%)
Tensão Última (MPa)	55,04	2,6
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,08	14,8
Deformação de Ruptura (%)	11,00	13,1

No ensaio de compressão uniaxial, o painel **BMJ-R** apresentou uma dispersão reduzida na propriedade de tensão última, porém foi moderadamente elevada quanto ao módulo de elasticidade e deformação de ruptura. A maior dispersão se verifica a partir do início do dano na matriz fragilizada pelo envelhecimento dos reforços no núcleo.

No painel **BMJ-R** também não foi observado o comportamento da alta taxa de deformação sem acréscimo da intensidade da tensão antes da fratura final (comportamento mostrado pelo laminado **BJ**), ou seja, o painel reciclado repetiu o comportamento do painel no estado original.

#### 7.1.8. Análise da Fratura do Painel **BMJ-R** na Compressão Uniaxial

A compressão do painel reciclado foi caracterizada pela formação de uma fratura do tipo “abaulamento ou bucho”, caracterizada pela face alargada e com visível aumento da espessura do núcleo na região do comprimento útil do corpo de prova. Esse mesmo modo de fratura foi detectado no laminado **BJ**.

O tipo de fratura que caracterizou o painel **BMJ-R** formado na compressão uniaxial pode ser visto através da figura 7.12, a seguir.



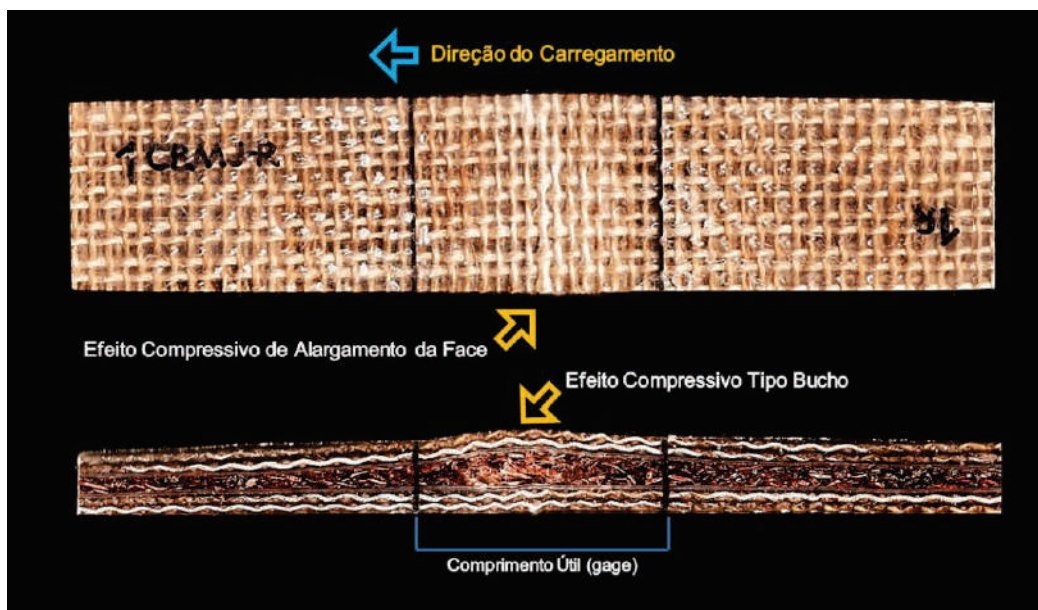


Figura 7.12. Corpos de prova fraturados na compressão do painel **BMJ-R**.

Na análise microscópica da fratura do painel **BMJ-R** foram observados danos comuns de fratura como microfissuração da matriz, fratura no interior do núcleo, fendas e fratura adesiva. É possível notar os efeitos compressivos causados no painel **BMJ-R**, através da comparação entre o núcleo híbrido antes e depois da fratura, como visto na figura 7.13 (a e b).

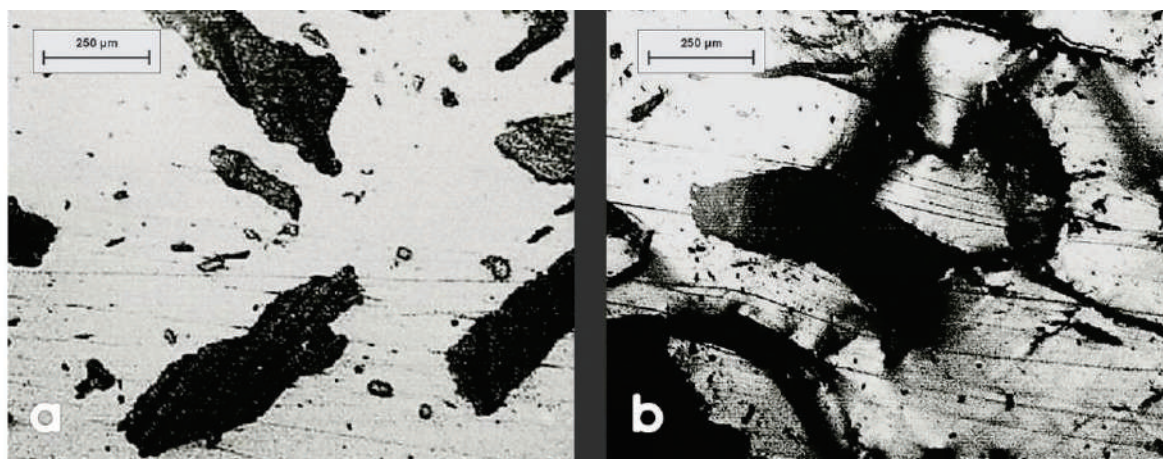


Figura 7.13. Painel **BMJ-R**: a) Núcleo antes da fratura; b) núcleo após a fratura na compressão uniaxial.

A compressão causou danos mais evidentes na região do núcleo híbrido, originando fraturas adesivas em resíduos de madeira, como pode visto na figura 7.14, assim como fraturas coesivas em resíduos de madeira, melhor observadas no MEV da figura 7.15.

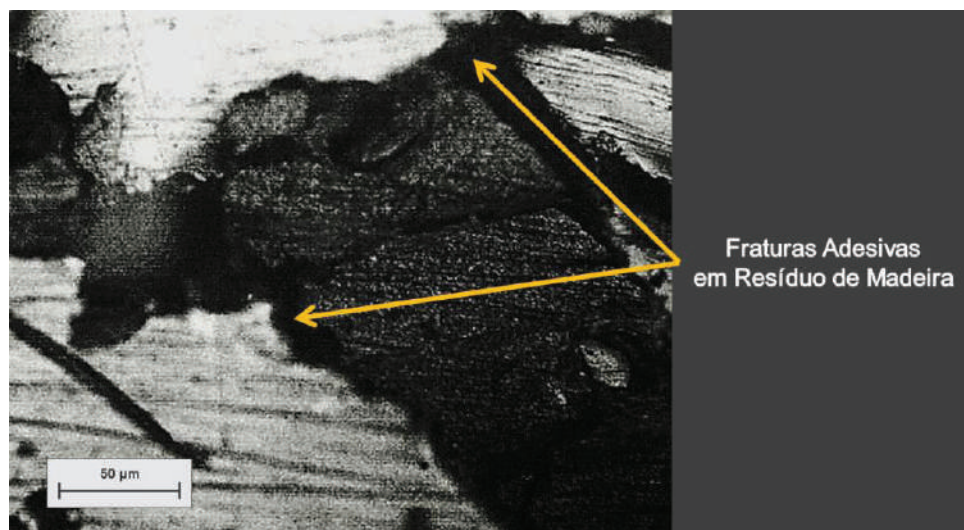


Figura 7.14. Fratura interna no núcleo híbrido do painel **BMJ-R**.

Um fato importante a ser ressaltado foi a não ocorrência de processos de descolamento de camadas, por delaminação na interface formada entre o núcleo híbrido e as camadas de tecido de fibras de juta, como presenciado no painel em estado original.

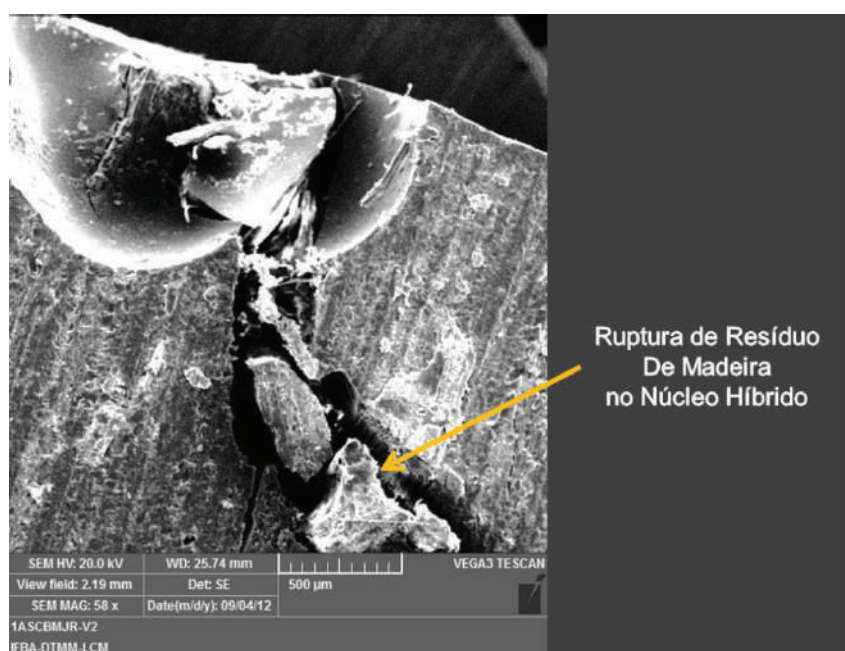


Figura 7.15. Fratura coesiva no núcleo híbrido do painel **BMJ-R**.

## 7.2. Influência do Processo de Reciclagem para o Painel **BMJ-R**

A análise da influência do processo de reciclagem do painel **BMJ-E** será realizada em duas partes:

Primeiro, através da observação do perfil das curvas médias de desempenho na tração uniaxial e compressão uniaxial por intermédio do diagrama tensão versus



deformação e quanto à flexão em três pontos através do diagrama de tensão versus deflexão. As curvas médias foram calculadas através dos valores médios relativos de cinco corpos de prova para cada ensaio.

Segundo, através de gráficos de barras comparativos para verificar a variação (ganho e perda) das propriedades mecânicas: tensão última, tensão máxima, módulos de elasticidade, percentual de deformação e de deflexão. Como referência será utilizada os dados de desempenho do painel em estado original, já apresentados no tópico 6.1.

### 7.2.1. Integridade Estrutural na Tração Uniaxial do Painel BMJ-R

O diagrama comparativo de tensão versus deformação entre o painel **BMJ** e o painel **BMJ-R** obtido no ensaio de tração uniaxial é apresentado na figura 7.16 em sequência.

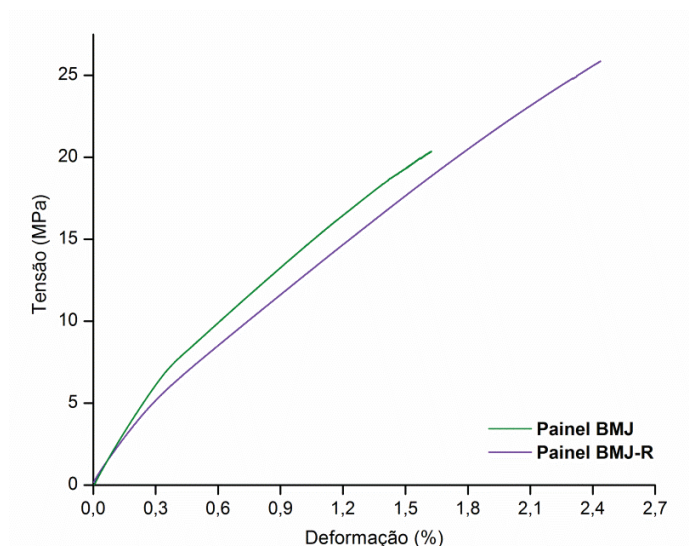


Figura 7.16. Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painel **BMJ** x Painel **BMJ-R** na tração uniaxial.

O painel **BMJ-R**, embora tenha apresentado leve perda no módulo, no geral, obteve um melhor desempenho que seu painel originário, assim como bastante superior ao painel envelhecido que lhe conferiu o reforço para a formação do núcleo híbrido. O processo de reciclagem e a configuração do novo núcleo com a inserção de fibras moídas de juta permitiu que o novo painel aumentasse sua capacidade de resistir ao esforço de tração, com superior capacidade de deformação.

A variação nos valores de tensão última, no módulo de elasticidade e no percentual de deformação pós-ensaio de tração uniaxial do painel **BMJ-R** pode ser observada nos comparativos das figuras 7.17, 7.18 e 7.19 respectivamente.

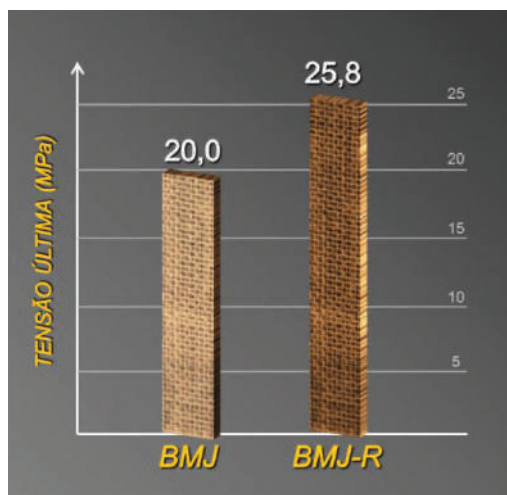


Figura 7.17. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** na tensão última.

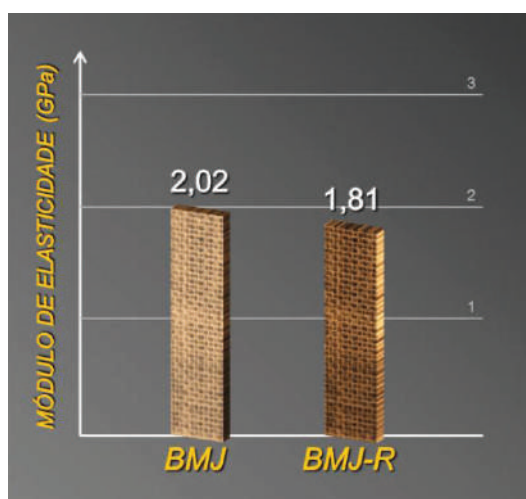


Figura 7.18. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** no módulo de elasticidade.

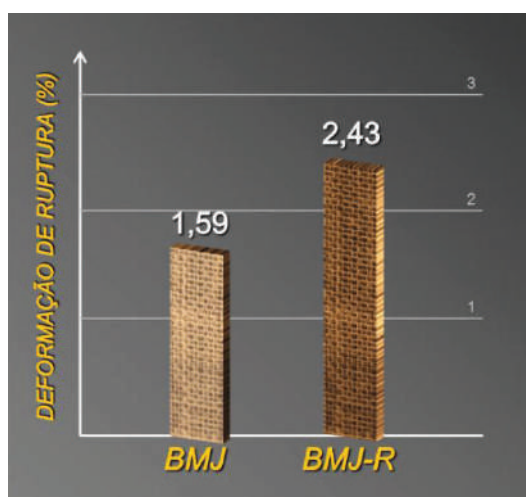


Figura 7.19. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** na deformação de ruptura.

O painel **BMJ-R** apresentou, na tração uniaxial, desempenho superior ao painel original em termos gerais, especialmente quanto à tensão última e deformação de ruptura,

porém houve uma discreta perda de aproximadamente 10% no módulo, como se percebe na tabela 7.5. Ressalta-se aqui que os valores referentes ao módulo de elasticidade são influenciados pelas cargas de início do dano.

Tabela 7.5. Variação de propriedades mecânicas do painel **BMJ-R** na tração uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Painel BMJ	Painel BMJ-R	VARIAÇÃO (%)
Tensão Última (MPa)	20,0	25,8	+ 22,5%
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,02	1,81	- 10,4%
Deformação de Ruptura (%)	1,59	2,43	+ 34,5%

### 7.2.2. Integridade Estrutural na Flexão em Três Pontos do Painel BMJ-R

Quando se observa as curvas médias na flexão, nota-se que o comportamento do painel reciclado não repetiu o bom desempenho verificado na tração. Há uma significativa perda no módulo, que contribui na perda de resistência do material, muito embora o mesmo tenha elevado sua capacidade de deflexão.

O diagrama comparativo de tensão versus deflexão entre o painel **BMJ** e o painel **BMJ-R** obtido no ensaio de flexão é apresentado na figura 7.20.

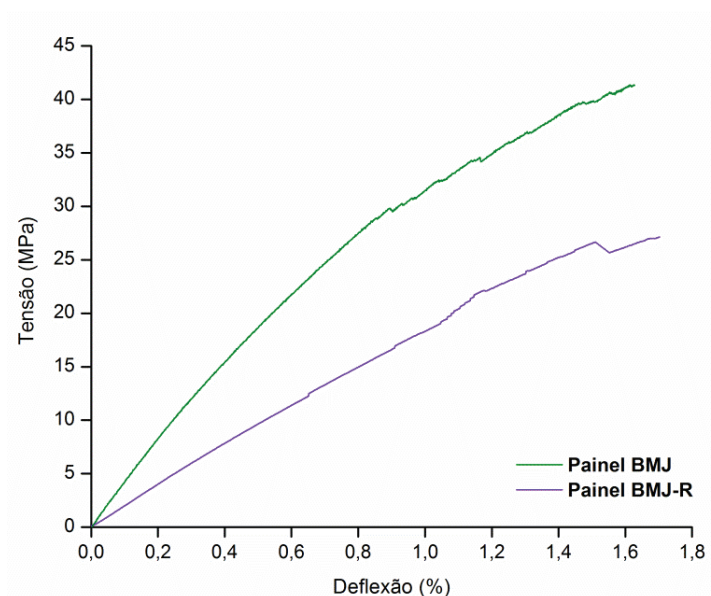


Figura 7.20. Diagrama comparativo de tensão versus deflexão: Painel **BMJ** x Painel **BMJ-R** na flexão em três pontos.

O painel **BMJ-R** apresentou um comportamento bastante semelhante ao painel original. As curvas médias formadas por ambos diferem quanto aos limites de tensão e

deformação de ruptura, consequência da perda de propriedades dos reforços presentes no núcleo híbrido. No entanto ambas apresentaram-se com reduzido grau de dispersão antes de iniciado o processo de fratura do material. Esse fato proporciona praticamente a mesma rigidez para ambos os painéis.

A variação nos valores de tensão máxima, no módulo de elasticidade e no percentual de deflexão pós-ensaio de flexão em três pontos do painel **BMJ-R** pode ser mais bem observada nos comparativos das figuras 7.21, 7.22 e 7.23 respectivamente.

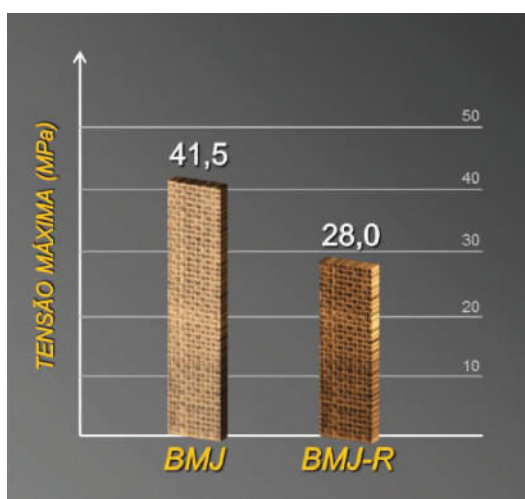


Figura 7.21. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** na tensão máxima.

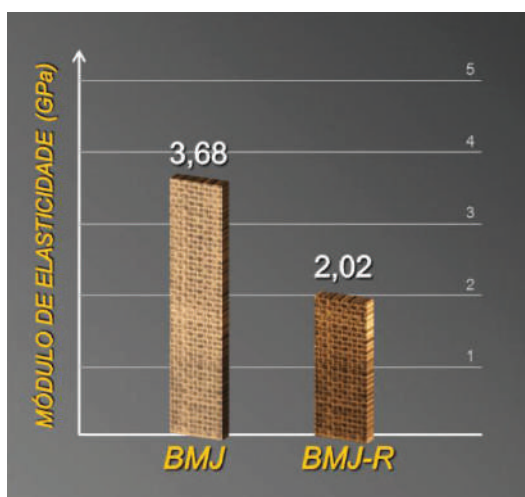


Figura 7.22. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** no módulo de elasticidade (flexão).

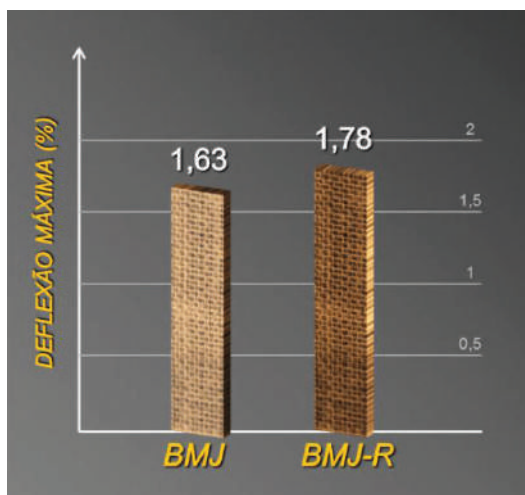


Figura 7.23. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** na deflexão máxima.

A característica do esforço exigido no ensaio de flexão e a estrutura do novo material justifica o desempenho inferior na flexão. A presença de fibras de juta moída e envelhecida distribuídas de modo aleatório no núcleo híbrido interferiu na capacidade da camada mais forte do painel de resistir ao esforço de ensaio.

É importante observar que compósitos necessitam tanto de manutenção, quanto qualquer outro material. O desgaste elevado do painel original poderá comprometer em parte a qualidade da sua reciclagem.

As perdas na tensão e no módulo, assim como a melhora na deflexão máxima podem ser mais bem observadas na tabela 7.6.

Tabela 7.6. Variação de propriedades mecânicas do painel **BMJ-R** na flexão em três pontos.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Painel BMJ	Painel BMJ-R	VARIAÇÃO (%)
Tensão Máxima (MPa)	41,5	28,0	- 32,5%
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,68	2,02	- 45,1%
Deflexão Máxima (%)	1,63	1,78	+ 8,4%

### 7.2.3. Integridade Estrutural na Compressão Uniaxial do Painel **BMJ-R**

O diagrama comparativo de tensão versus deformação entre o painel **BMJ** e o painel **BMJ-R** obtido no ensaio de compressão uniaxial é apresentado na figura 7.24, a seguir.



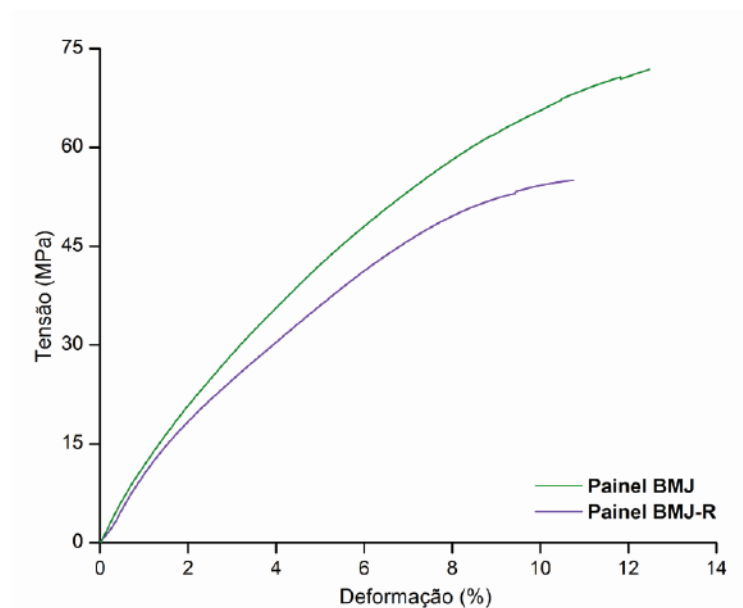


Figura 7.24. Diagrama comparativo de tensão versus deformação: Painel **BMJ** x Painel **BMJ-R** na compressão uniaxial.

O painel **BMJ-R** apresentou um comportamento bastante semelhante ao painel original. As curvas médias formadas por ambos diferem quanto aos limites de tensão e deformação de ruptura, consequência da perda de propriedades dos reforços presentes no núcleo híbrido. No entanto ambas mantiveram-se com reduzido grau de dispersão antes de iniciado o processo de fratura do material.

A variação nos valores de tensão máxima, no módulo de elasticidade e no percentual de deflexão pós-ensaio de compressão uniaxial do painel **BMJ-R** pode ser observada nos comparativos das figuras 7.25, 7.26 e 7.27 respectivamente.

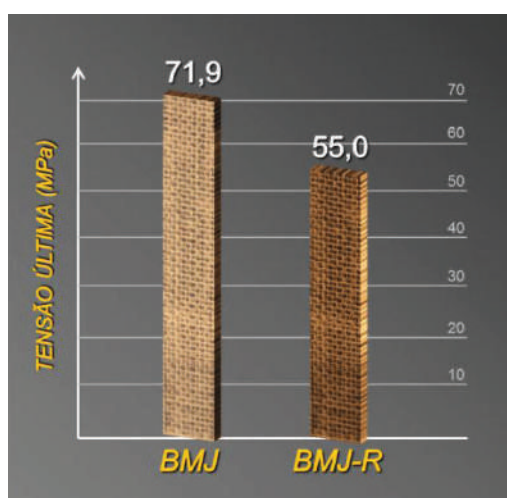


Figura 7.25. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** na tensão máxima (compressão).

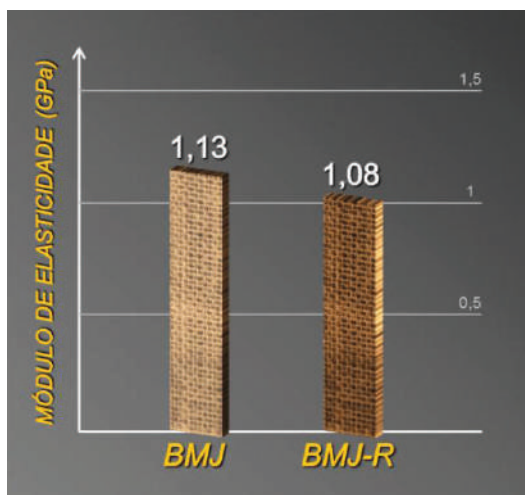


Figura 7.26. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** no módulo de elasticidade (compressão).

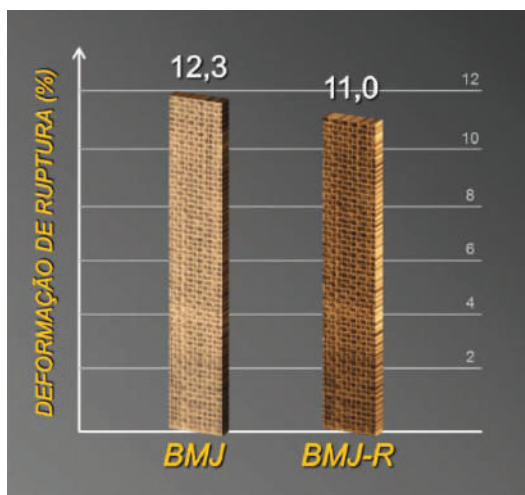


Figura 7.27. Comparativo: Painel **BMJ** x painel **BMJ-R** na deformação máxima (compressão).

Muito embora o painel original e reciclado tenha apresentado na compressão tipos diferentes de fratura, em muito devido à modificação de configuração de seu núcleo, a variação das propriedades foi satisfatória, como pode ser observado nas reduzidas perdas, sobretudo no módulo e na deformação, como bem observado na tabela 7.7.

Tabela 7.7. Variação de propriedades mecânicas do painel **BMJ-R** na compressão uniaxial.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Painel BMJ	Painel BMJ-R	VARIAÇÃO (%)
Tensão Última (MPa)	71,9	55,0	- 23,5%
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,13	1,08	- 4,4%
Deformação de Ruptura (%)	12,3	11,0	- 10,5%

O novo painel obteve desempenho superior ao original e ao envelhecido na tração e comportamento muito próximo ao **BMJ** na compressão. As perdas apresentadas na flexão em três pontos decorreram basicamente da nova composição de seu núcleo que, em termos gerais, modificaram a configuração do material.

Processo de reciclagem de biocompósitos com matrizes termoplásticas é bem conhecido (Boeglin *et al.*, 1997) (Le Duigou *et al.*, 2009), contudo ao se analisar o desempenho mecânico geral do novo material o processo adotado para a reciclagem do painel **BMJ** a partir de uma matriz termofixa fica, claramente validado.

## CAPÍTULO VIII

### 8 INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO NO DESEMPENHO MECÂNICO DOS BIOCOMPÓSITOS

---

Este capítulo analisará por meio de estudos comparativos entre os biocompósitos a influência da configuração dos mesmos, caracterizada pela presença dos núcleos (original e reciclado) nas propriedades mecânicas nas diversas condições de ensaios.

A análise se dará em três partes distintas: a primeira estabelecerá relações entre os tipos característicos das fraturas apresentadas em cada ensaio e os danos ocorridos nos laminados e painéis produzidos; a segunda parte inicialmente estabelecerá comparações entre o desempenho mecânico do laminado (**BJ**) com os painéis no estado original (**BMJ**) e reciclado (**BMJ-R**); em seguida será determinada essa influência nas propriedades residuais dos biocompósitos submetidos, tanto aos processos de envelhecimento ambiental acelerado e de imersão em água destilada, quanto ao processo de reciclagem. O estudo tem por parâmetro o laminado **BJ** e o painel no estado original **BMJ**. Todas as configurações o foram analisadas nos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos, e apenas os biocompósitos originais e o painel reciclado foram observados quanto à compressão; por último será apresentado e comentado um comparativo entre a deterioração por perda de massa entre os biocompósitos produzidos e a resina náutica que lhes serviu de matriz.

#### 8.1. Comparativo de Fratura em Biocompósitos

O entendimento do mecanismo de dano depende do monitoramento contínuo ao longo dos ensaios e da análise das características e dos tipos de fraturas presentes nos corpos de prova. A formação e a propagação dos danos dependerão de fatores como: a qualidade do sistema fibra/matriz, do processo de fabricação empregado, da configuração do compósito e do tipo e das características das cargas aplicadas para se medir às propriedades desejadas.

Com uma gama extensa de variáveis a serem observadas, não resta dúvida que cada tipo de compósito a ser estudado demandará características e modos de fratura particulares. Tal fato fica evidente nessa análise dos biocompósitos desenvolvidos. Todavia ao se comparar os tipos de danos presentes em cada ensaio realizado, seja na tração uniaxial, flexão em três pontos ou na compressão uniaxial, pretende-se entender como a presença do

núcleo em laminados compósitos interfere na formação e propagação do dano através de um estudo comparativo.

Contudo as três configurações em estado original: laminado **BJ**, painel **BMJ** e painel **BMJ-R** aqui desenvolvidos sob as diversas condições de ensaio anteriormente demonstradas, apresentaram alguns aspectos em comum. Os mais significantes foram o mesmo modo de fratura final do tipo LGM e a concentração de danos na região de fratura final, que resultaram numa distribuição menos intensa ao longo dos corpos de prova o que tornam por caracterizar tais materiais como frágeis.

### 8.1.1. Fratura nos Biocompósitos no Estado Original

Na análise das fraturas entre biocompósitos no estado original referente ao ensaio de tração uniaxial, observa-se que as diferentes composições na estrutura produziram danos diferenciados, até mesmo entre os painéis **BMJ** e **BMJ-R**, como é demonstrado na figura 8.1.

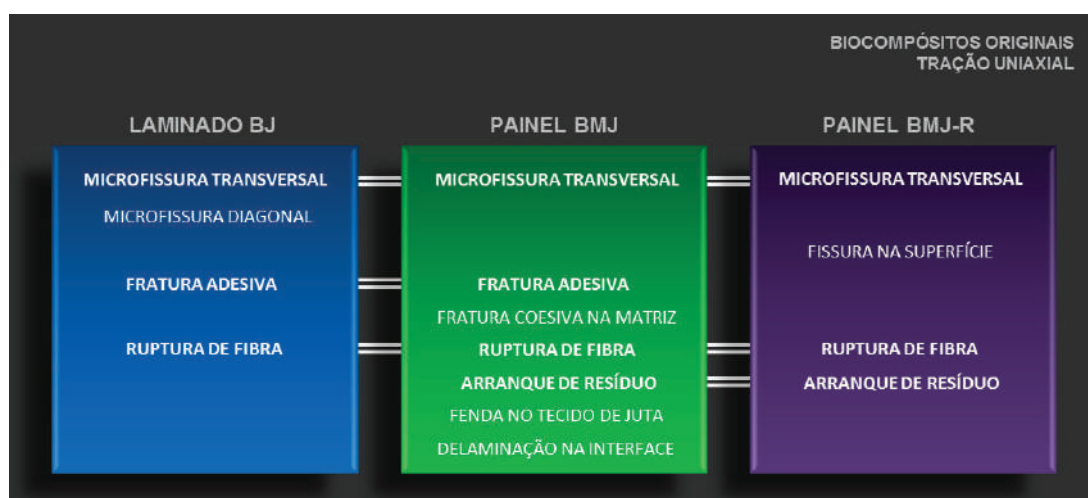


Figura 8.1. Relação entre tipos de fratura dos biocompósitos originais na tração uniaxial.

Apenas dois aspectos estiveram presentes em todos os materiais, as microfissuras transversais e as rupturas de fibra. Não ocorreram muitos pontos de correlação entre os painéis (arranque de resíduo) ou destes com o laminado **BJ** (fratura adesiva), o que reforça que as modificações nos biocompósitos podem resultar em distintas características de fratura. O núcleo híbrido não apenas melhorou o desempenho mecânico do painel **BMJ-R**, mas, tornou-o também menos propenso aos danos registrados no painel original.



No caso da flexão em três pontos outro fator é percebido. Os compósitos que não tiveram em sua composição qualquer material envelhecido ou degradado registraram um maior número de aspectos em comum, como visto na figura 8.2.



Figura 8.2. Relação de tipos de fratura entre biocompósitos na flexão em três pontos.

O laminado **BJ** e o painel **BMJ** apresentaram cinco tipos de fratura comuns, enquanto que entre os painéis, quatro foram os semelhantes. Em todos os compósitos ocorreram bifurcações da fratura final na região comprimida com ramificações e rupturas de fibra, este último aspecto foi comum a todos os biocompósitos aqui estudados.

No ensaio de compressão a qualidade do sistema fibra/matriz e o tipo de carga aplicada produziram comportamentos bastante distintos. Na prática, não foram observadas importantes relações de semelhança nem mesmo entre os painéis, a exceção da fratura adesiva e da, já comentada, ruptura de fibra, como observado no comparativo da figura 8.3.



Figura 8.3. Relação de tipos de fratura entre biocompósitos na compressão uniaxial.

Entre os biocompósitos no estado original o painel **BMJ** registrou um maior número de microfissuras, fraturas, rupturas de fibras, fendas ou delaminações, notadamente em relação ao painel reciclado. O melhoramento do processo de laminação do **BMJ-R** diminuiu a ocorrência de imperfeições, além de melhorar as variadas interfaces do painel, resultando com isto num mecanismo de dano menos intenso.

### 8.1.2. Fratura nos Biocompósitos no Estado Envelhecido

Na análise das fraturas entre os biocompósitos em estado envelhecido ou com componentes que sofreram envelhecimento, observa-se que na tração uniaxial as diferentes composições na estrutura mantêm os danos diferenciados. Há, entretanto um maior número de fraturas, que permitem estabelecer relações tanto entre painéis quanto destes com o laminado **BJ-E**, como é demonstrado na figura 8.4.



Figura 8.4. Relação de tipos de fratura entre biocompósitos envelhecidos na tração uniaxial.

Dois aspectos se apresentam em comum: as microfissuras transversais e as rupturas de fibra, já observadas nos biocompósitos em estado original. A formação de fendas no tecido de juta assim como as fraturas adesivas (linhas pontilhadas) e de fibras se apresentaram no laminado envelhecido. Nota-se uma maior semelhança no comportamento dos painéis, os quais como esperados registraram arranque de resíduos, muito embora com a presença de outros tipos particulares de dano.

Na flexão em três pontos a degradação decorrente da umidade produziu mais danos do que nos biocompósitos que passaram pelo envelhecimento ambiental acelerado, resultando em delaminação, formação de fendas transversais e rompimento de tecido de juta, como notado na figura 8.5, a seguir.



Figura 8.5. Relação de tipos de fratura entre biocompósitos envelhecidos na flexão em três pontos.

A ruptura de fibras e a bifurcação na fratura final foram os tipos que se repetiram em todos os compósitos. O painel **BMJ-U** apresentou relações de semelhança da fratura com o laminado envelhecido e principalmente com o painel **BMJ-E** (fratura em resíduos e desaderência resíduo/matriz).

## 8.2. Comparativo de Desempenho Mecânico dos Biocompósitos

O estudo comparativo do desempenho mecânico entre biocompósitos em estado original e da integridade estrutural para os em estado envelhecido é fundamental para se entender de que modo a configuração e a presença de um núcleo poderão beneficiar ou não tais materiais e em quais aspectos.

Para tanto foi adotado padrões de referência dentro do próprio estudo, permitindo assim estabelecer relações de semelhança entre os materiais configurados e testados nas mesmas condições.

### 8.2.1. Desempenho Mecânico dos Biocompósitos no Estado Original

O desempenho mecânico dos biocompósitos laminado **BJ**, painel **BMJ** e painel **BMJ-R** no estado original, será avaliado a partir do material que apresentou o melhor desempenho em cada propriedade mecânica nos ensaios de tração, flexão e compressão.

Em todos os ensaios realizados o laminado **BJ**, configuração sem a presença de um núcleo, registrou os melhores resultados, sendo assim apresentado nos comparativos pelo índice de 100%, para que assim seja verificada a variação das propriedades mecânicas dos demais painéis fabricados em relação ao primeiro.

A presença de um núcleo aumenta o número de camadas e, por conseguinte também o número interfaces, tornando mais complexa a perfeita adesão entre as camadas, bem como da interface entre reforço e resina. Em grande parte, isto explica o desempenho mecânico inferior que os painéis apresentaram.

Apesar das melhorias em sua fabricação o painel **BMJ-R** possui em seu núcleo híbrido reforços degradados, que embora estejam protegidos por novas camadas de resina e de tecido bidirecional de fibras de juta, estes podem ter reduzido seu desempenho mecânico em alguns ensaios.

Na figura 8.6 estão dispostas, em comparativo, as variações nas propriedades de tensão e de módulo de elasticidade medidos na tração uniaxial dos painéis **BMJ** e **BMJ-R** em relação ao laminado **BJ**, enquanto que nas figuras 8.7 e 8.8 apresentam essas variações de propriedades para os casos de flexão em três pontos e da compressão uniaxial, respectivamente.

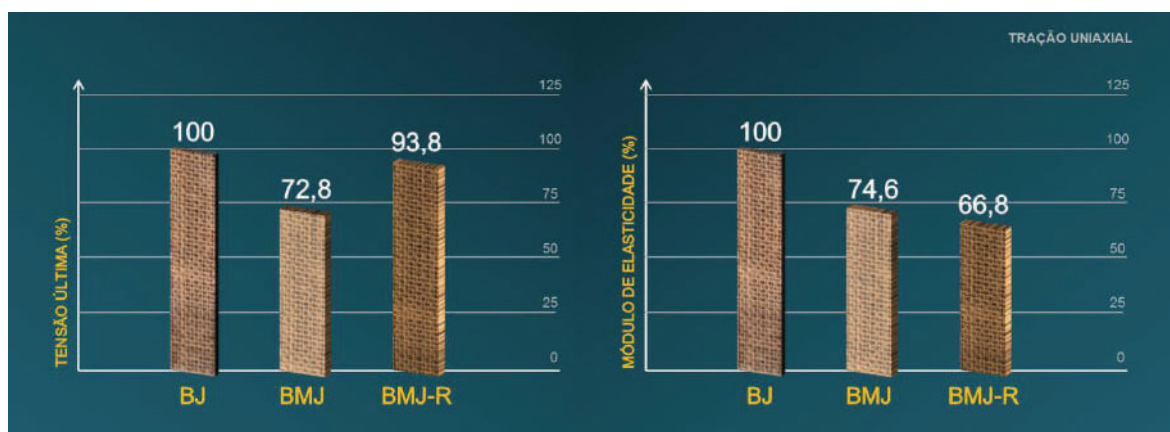


Figura 8.6. Variação entre propriedades dos biocompósitos originais na tração uniaxial.

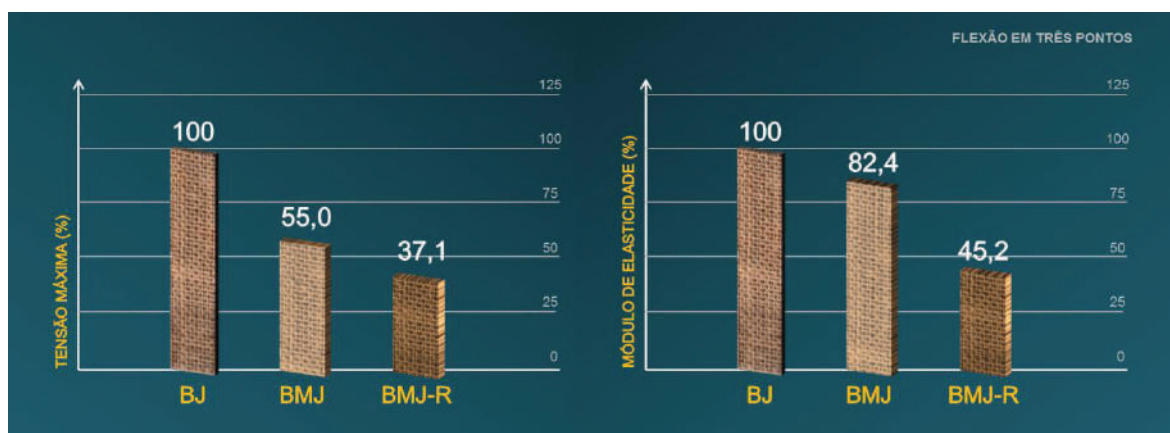


Figura 8.7. Variação entre propriedades dos biocompósitos originais na flexão em três pontos.

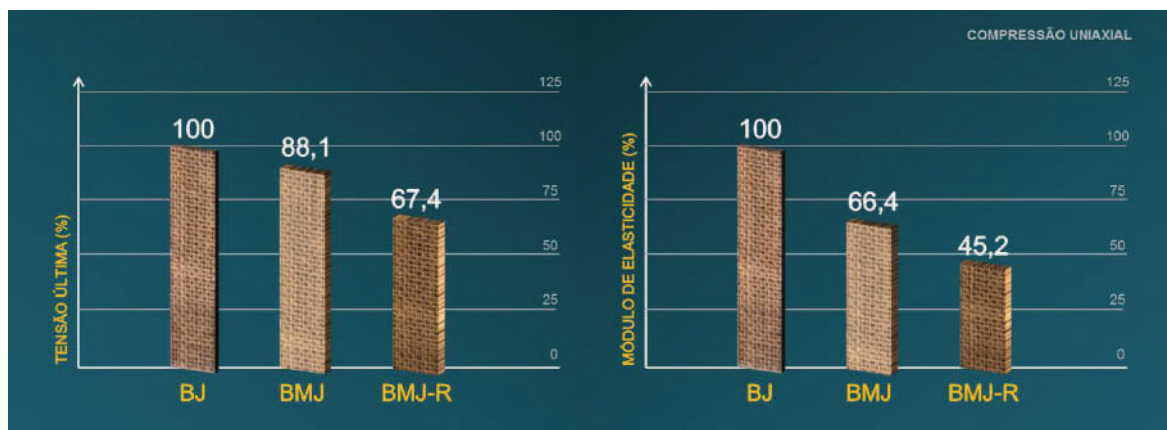


Figura 8.8. Variação entre propriedades dos biocompósitos originais na compressão uniaxial.

É importante notar que o fato de na tração a tensão última do painel reciclado ter superado a do painel em estado original pode decorrer, além da característica do esforço do ensaio já comentado no capítulo 6, de uma concentração aleatória de reforço com menor degradação em seu núcleo, já que apenas uma face dos corpos de prova reprocessados foi totalmente exposta ao envelhecimento ambiental acelerado.

### 8.2.2. Integridade Estrutural dos Biocompósitos no Estado Envelhecido

O desempenho mecânico dos biocompósitos laminado **BJ-E**, painel **BMJ-E** e painel **BMJ-U** no estado envelhecido ou degradado pela saturação na água destilada, serão aqui avaliados em termos das suas respectivas integridades estruturais, ou seja, a partir da determinação das propriedades residuais (retenção das propriedades) de resistência e módulo de elasticidade com relação às mesmas configurações em estado original.

Tanto a resistência residual quanto o módulo de elasticidade residual foram determinados pela razão entre os respectivos valores obtidos no estado envelhecido e no estado original para cada biocompósito estudado. No caso do painel **BMJ-R** a presença nos comparativos de suas propriedades residuais se justifica pelo fato dos reforços de seu núcleo terem passado pelo processo de envelhecimento. Todo o estudo será desenvolvido através do comparativo dessas propriedades para os ensaios de tração e flexão em três pontos.

A figura 8.9 mostra os valores da resistência residual e módulo de elasticidade residual medidos na tração uniaxial dos biocompósitos envelhecidos e degradados. Já a figura 8.10 mostra os valores da resistência residual e módulo de elasticidade residual medidos na flexão em três pontos dos mesmos biocompósitos já observados na tração.



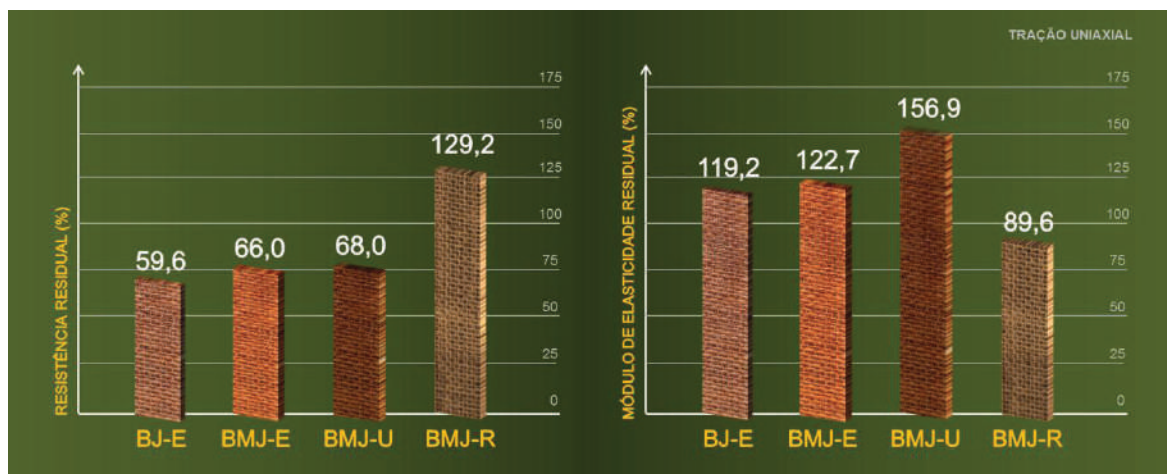


Figura 8.9. Resistência residual e módulo de elasticidade residual dos biocompósitos envelhecidos na tração uniaxial.

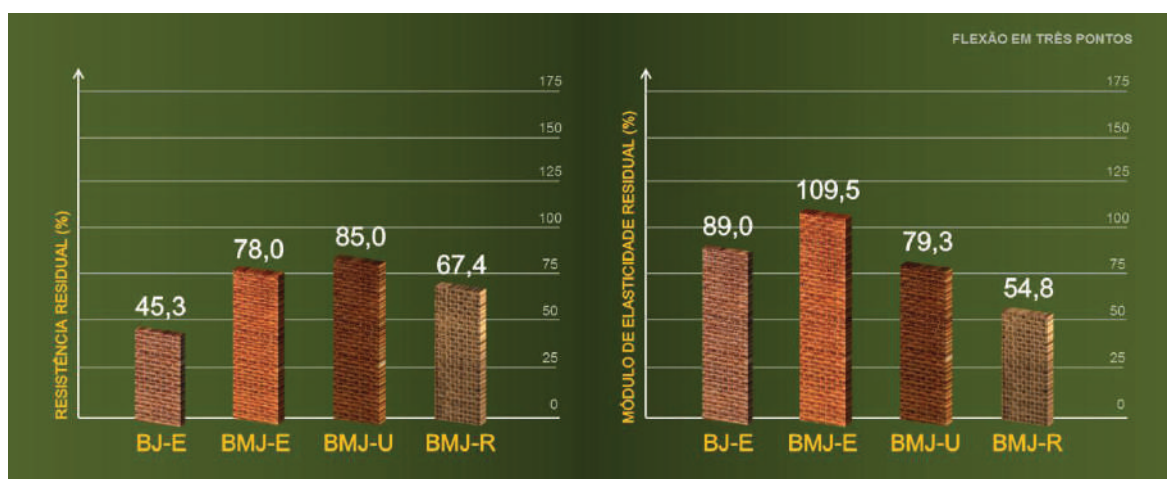


Figura 8.10. Resistência residual e módulo de elasticidade residual dos biocompósitos envelhecidos na flexão em três pontos.

Nas figuras acima, 8.9 e 8.10 se observa que o laminado **BJ**, que no estado original apresentou um desempenho superior aos demais biocompósitos em termos de resistência, demonstrou ter maior suscetibilidade ao envelhecimento acelerado, registrando os menores valores de retenções dessa propriedade, quando comparado ao painel **BMJ**, independente do tipo de carregamento, condições de envelhecimento e processo de reciclagem.

Quase todos os materiais envelhecidos apresentaram melhora em seu módulo de elasticidade na tração, a exceção do painel **BMJ-R**.

Para finalizar as análises de desempenho mecânico, na figura 8.11 é possível observar em visão simultânea um comparativo global da resistência última e rigidez dos biocompósitos em estado original, envelhecidos e reciclado em todos os ensaios realizados.

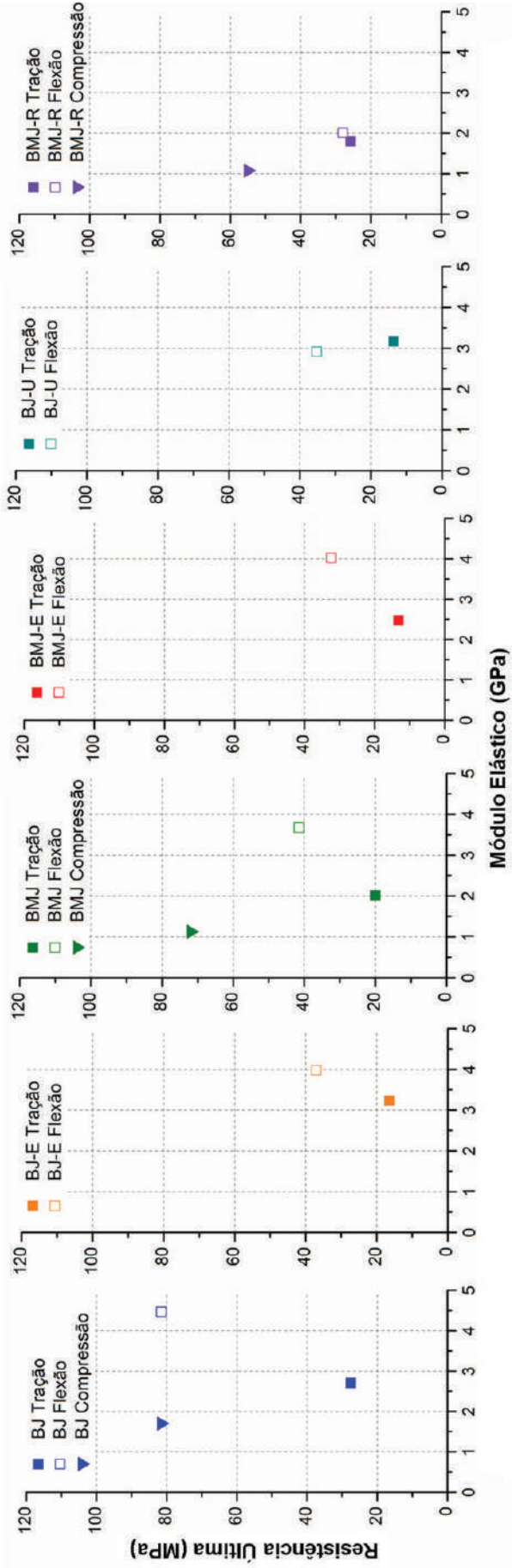


Figura 8.11. Comparativo global do desempenho mecânico dos biocompósitos.

É importante salientar que a presença do núcleo de resíduos de madeira teve direta responsabilidade nas menores perdas na resistência residual e no módulo de elasticidade residual. A camada intermediária funcionou como barreira às camadas opostas e não expostas aos fatores climáticos, permitindo uma maior retenção das propriedades mecânicas.

A análise através do comparativo acima permite observar como o laminado sofre uma maior degradação quando envelhecido, perdendo grande parte de seu desempenho, sobretudo na flexão. Também fica evidente que nas diferentes configurações e condições, muito embora tenha apresentado resultados inferiores ao laminado em estado original, o painel **BMJ** consegue manter a maior parte de suas propriedades mecânicas, ou seja, possui uma maior vida útil em condições de serviço.

### 8.3. Comparativo de Deterioração por Perda de Massa

O estudo da perda de massa realizado de modo contínuo durante o teste de envelhecimento e imediatamente ao final dos ciclos de radiação e de umidade por vapor aquecido, como descrito nos capítulos 3, 4, 5 e 6 pretende aqui entender como tais fatores se relacionam entre os biocompósitos com e sem a presença de um núcleo em sua configuração. A figura 8.12, a seguir, é um comparativo entre a perda de massa dos biocompósitos em relação à resina náutica durante o teste de envelhecimento ambiental acelerado, perdas essas medidas após exposição ao ciclo de radiação ultravioleta.

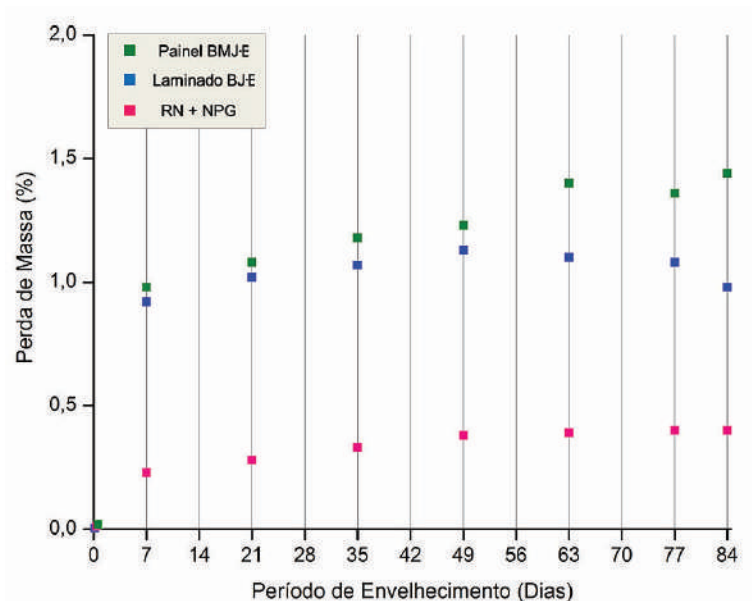


Figura 8.12. Perda de massa entre a resina náutica e biocompósitos envelhecidos após exposição de radiação ultravioleta.

Em observância aos resultados, a perda de massa registrada unicamente na resina corresponde apenas a 27% da perda registrada pelo painel **BMJ-E** e 34% da perda registrada pelo laminado **BJ-E**.

Já na figura 8.13 é observado um comparativo entre a perda de massa dos biocompósitos em relação à resina náutica durante o teste de envelhecimento ambiental acelerado, perdas essas medidas após exposição ao ciclo de vapor aquecido.

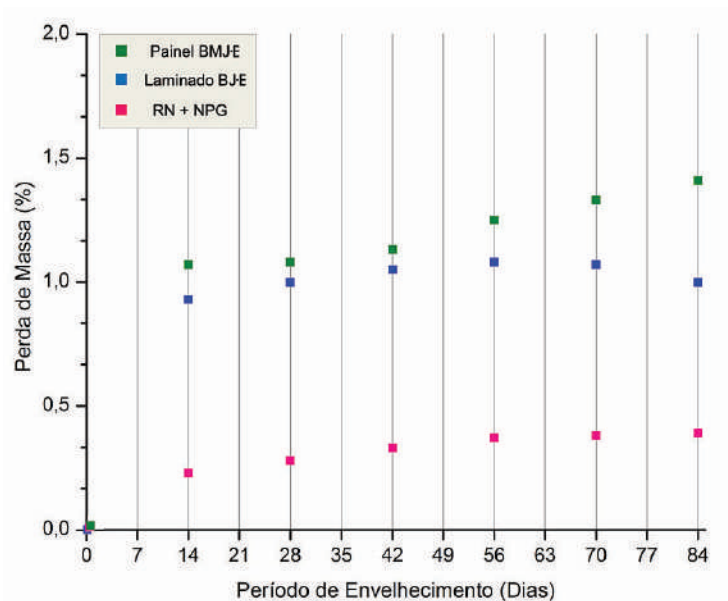


Figura 8.13. Perda de massa entre a resina náutica e biocompósitos envelhecidos após exposição de vapor aquecido.

No caso das medidas efetuadas após o ciclo de vapor aquecido, os resultados mostram que a perda de massa verificada unicamente pela resina, equivale a 28% da perda ocorrida no painel **BMJ-E** e 40% da perda registrada no laminado **BJ-E**.

Como esperado os biocompósitos perdem mais massa que a resina, isto devido à degradação dos reforços naturais, mais sensíveis aos efeitos da temperatura elevada e da absorção de umidade e principalmente da degradação ocorrida na interface fibra/resina. Há, contudo um ponto importante para se destacar, o painel **BMJ**, perde massa apresentando o mesmo perfil que o da resina náutica.

Outro fator também a ser levado em conta é a qualidade de adesão entre as camadas tanto do laminado **BJ** quanto do painel **BMJ**, as quais podem ter sido afetadas pelo processo de envelhecimento. Todos esses fatores contribuem para que a resina náutica perca em grande parte a sua capacidade de suportar intempéries sem sofrer um processo mais intenso de deterioração.

## CAPÍTULO IX

# CONCLUSÕES

---

### 9.1. Análise da Fratura dos Materiais em Estado Original

As três configurações de biocompósitos em estado original: laminado **BJ**, painel **BMJ** e painel **BMJ-R** apresentaram aspectos em comum na tração uniaxial. A característica da fratura final foi do mesmo tipo LGM, com uma concentração de danos na região de fratura final, o que tornam por caracterizar tais materiais como frágeis. A formação e propagação destas fraturas mostraram que as diferentes composições na estrutura produziram danos diferenciados, até mesmo entre os painéis **BMJ**. No painel **BMJ-R**, o núcleo híbrido possibilitou uma melhora em seu desempenho mecânico, tornando-o menos propenso a formação das microfissuras registradas no painel original.

Na flexão em três pontos, a fratura dos compósitos registrou um maior número de aspectos em comum, tanto entre painéis quanto destes com o laminado, como resultado da adoção da face envelhecida dos corpos de prova como a superfície a ser tracionada durante o ensaio, acarretando numa maior diferenciação na formação e propagação dos danos para os materiais submetidos a essa condição de ensaio.

Na compressão uniaxial, a qualidade do sistema fibra/matriz e o tipo de carga aplicada produziram nas diferentes configurações, comportamentos bastante distintos, não sendo observadas relações de semelhança entre os materiais.

### 9.2. Análise da Fratura dos Materiais Envelhecidos

As três configurações de biocompósitos submetidas a processos de envelhecimento por aceleração de fatores climáticos ou pela absorção de umidade em meio à água destilada: laminado **BJ-E**, painel **BMJ-E** e painel **BMJ-U**, em oposição aos materiais em estado original, apresentaram aspectos em comum na tração uniaxial, até mesmo quando correlacionados aos danos apresentados pelo painel reciclado.

Na flexão em três pontos, os painéis **BMJ-E** e **BMJ-U** apresentaram muitos aspectos de semelhança, assim como um maior número de tipos de danos, com bifurcações e rupturas de fibras em todas as amostras ensaiadas.



### 9.3. Desempenho Físico e Mecânico dos Materiais em Estado Original

O desempenho mecânico da resina **RN+NPG** em estado original nos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos foram superiores na tensão e deformação aos apresentados pelos biocompósitos com ela produzidos, contudo todos os biocompósitos obtiveram melhorias em seus módulos na tração uniaxial e a maioria destes também tiveram desempenho acima da resina na flexão. A elevação média do módulo de elasticidade na tração variou de 10% para o painel **BMJ-R** a quase 40% no laminado **BJ**. Na flexão apenas o painel reciclado não obteve melhoria em seu módulo na comparação com a resina náutica.

Os biocompósitos apresentaram reduzidas densidades volumétricas. O laminado **BJ** e o painel **BMJ** registraram o mesmo valor médio de  $1,18 \text{ g/cm}^3$ , enquanto que o painel reciclado, devido à desidratação resultante do envelhecimento dos reforços e da substituição de parte dos resíduos de madeira em seu núcleo por fibras de juta moídas, obteve um valor médio ainda menor de  $1,16 \text{ g/cm}^3$ . Em todos os materiais, a dispersão global se apresentou inferior a 1%.

No estudo do comportamento mecânico, a configuração sem a presença de um núcleo (laminado **BJ**), apresentou um desempenho mecânico superior aos painéis (configurações com núcleo) em todos os ensaios realizados.

Na tração, o laminado obteve desempenho 6,2% superior ao painel **BMJ-R** e 27,2% superior ao Painel **BMJ**. Na flexão, o desempenho do mesmo laminado foi bastante superior, 45% acima do painel **BMJ** e 62,9% sobre o painel **BMJ-R**. Na compressão o laminado foi 11,9% superior ao painel **BMJ** e 32,6% acima que o valor apresentado pelo painel reciclado. A presença do núcleo aumentou o número de interfaces da configuração, tornando mais complexa a perfeita adesão entre as camadas de reforço, o que diminuiu a resistência dos painéis.

Uma concentração aleatória de reforços com menor degradação em seu núcleo e a característica do esforço do ensaio pode ter influído na melhoria da tensão última do painel **BMJ-R** superando em 21% o desempenho do painel em estado original.

### 9.4. Integridade Estrutural dos Biocompósitos Envelhecidos

Diferente do que ocorreu com os materiais ensaiados em estado original, a configuração sem a presença do núcleo (laminado **BJ**), demonstrou ter maior

suscetibilidade ao envelhecimento ambiental acelerado, registrando os menores valores na retenção das propriedades mecânicas, quando comparado aos demais materiais envelhecidos, independente do tipo de carregamento e das condições de envelhecimento ou degradação. Este laminado apresentou apenas 59,6% de resistência residual na tração e 45,3% de resistência residual na flexão.

Na tração uniaxial todos os biocompósitos expostos a fatores climáticos obtiveram maiores níveis de retenção quando comparados às mesmas configurações não envelhecidas. O módulo de elasticidade residual do painel **BMJ-U** foi o que apresentou o melhor resultado, com melhoria de quase 57%, seguido pelo painel **BMJ-E** com elevação de 22,7%.

Na flexão, o painel saturado na água destilada teve maior resistência residual que os demais, com 85% de retenção em comparação com o painel **BMJ**. O painel **BMJ-U** também obteve o melhor percentual de retenção entre todos os materiais envelhecidos. Quanto ao módulo residual, todavia, o painel **BMJ-E** foi o que apresentou o melhor comportamento, com índice 9,5% superior ao painel que lhe originou, sendo o único material envelhecido que registrou melhoria nos dois ensaios mecânicos.

No comparativo global entre envelhecidos, os painéis **BMJ-U** e **BMJ-E** apresentaram as melhores médias de retenção de propriedades, com 97,3% e 94,05%, respectivamente. A presença do núcleo de resíduos de madeira funcionou como barreira aos fatores climáticos, permitindo uma maior retenção das propriedades mecânicas. O maior número de camadas, embora dificulte a obtenção de propriedades elevadas, aumentou a resistência do material frente às intempéries, mantendo por mais tempo suas características mecânicas e estéticas. A resina funcionou melhor diante da umidade do que diante dos fatores climáticos combinados (radiação UV e vapor aquecido), o que justificou o melhor desempenho do painel saturado (**BMJ-U**).

### 9.5. Deterioração por Perda de Massa

A qualidade da adesão entre as camadas dos biocompósitos foram afetadas pelo processo de envelhecimento, o que contribuiu para que a resina perdesse parte de sua capacidade de suportar intempéries. A maior presença de camadas com resina náutica, mais diretamente susceptível ao envelhecimento, contribuiu para que a deterioração por perda de massa do painel **BMJ-E** foi superior ao do laminado **BJ-E** durante a exposição à

radiação ultravioleta e à umidade por vapor aquecido, apresentando o mesmo perfil de perda da resina **RN+NPG**.

Na análise morfológica de superfície ficou demonstrado que apesar das perdas de propriedades, dos materiais expostos aos fatores climáticos, a resina náutica preservou superficialmente os reforços durante o envelhecimento, quando comparada com a resina poliéster ortoftálica.

## 9.6. Processo de Reciclagem do Painel BMJ

O envelhecimento em elevado estado de parte dos reforços utilizados na formação do núcleo híbrido do painel **BMJ-R** pode ter influenciado na comparação de desempenho com o painel original. A melhoria na tensão última na tração não se repetiu nos demais ensaios, os módulos se mantiveram inferiores aos demais painéis, houve perdas consideráveis de resistência na flexão, porém este material obteve boa resistência na compressão.

O painel reciclado conseguiu reter 84,7% do desempenho médio do painel em estado original e melhorar em 1,3% o desempenho geral do painel que lhe doou os reforços do núcleo. As perdas apresentadas no ensaio de flexão decorreram basicamente da nova composição de seu núcleo que, em termos gerais, alterou a rigidez do material, comprovada pelos reduzidos valores nos módulos, no entanto o processo adotado para a reciclagem do painel **BMJ** fica validado quando observada a retenção de propriedades nos ensaios de tração e compressão uniaxial, que em ambos os casos se apresentaram superiores a 85% sem contar a reduzida ocorrência de danos na análise de fratura.

## 9.7. Observações Finais

Os polímeros reforçados com materiais de origem vegetal apresentam um ciclo de vida reduzido, com perda de propriedades, em alguns casos acentuados, todavia oferecem um baixo custo de aquisição e processamento. A sua maior capacidade de degradação, que poderia significar um empecilho a sua aplicação industrial, também representa o benefício de oferecer um menor impacto ao meio ambiente.

A reciclagem realizada neste estudo possibilitou uma extensão do ciclo de vida do material, para moderadas condições de serviço. Entretanto os benefícios socioeconômicos decorrentes da redução do despejo de matéria orgânica na natureza (resíduos de madeira

em lixões de centros urbanos) ou de materiais processados industrialmente evita que os mesmos funcionem como agentes poluentes dos meios urbanos ou rurais, que se constitui uma das maiores agressões ao nosso ecossistema.

### **9.8. Recomendações para Futuros Trabalhos**

- Estudar o desempenho mecânico, a qualidade da adesão resina/fibra assim como a mecânica da fratura em biocompósitos a partir da mesma resina náutica com outros tipos de reforços naturais brasileiros;
- Desenvolver padrões comparativos entre a degradação ambiental acelerada e realizada naturalmente em biocompósitos para que se estabeleçam relações entre os mecanismos de envelhecimento e os padrões de tempo para a observação da qualidade do ciclo de vida destes materiais;
- Aperfeiçoar os procedimentos adotados para a reciclagem, classificando a qualidade da matéria-prima degradada, o tempo para reposição e o processamento dos reforços a fim de se produzir materiais com melhores índices de retenção de propriedades mecânicas;

## CAPÍTULO X

## REFERÊNCIAS

ABDULLAH-AL-KAFI; ABEDIN, M. Z.; BEG, M. D. H.; PICKERING, K. L. & MUBARAK A. K.: *Study on the Mechanical Properties of Jute/Glass Fiber-reinforced Unsaturated Polyester Hybrid Composites: Effect of Surface Modification by Ultraviolet Radiation*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 25, n. 6, 2006.

AGECOM. *Inauguração de Brasjuta é resultado da primeira parceria público-privada pela AFEAM*. Agência de Comunicação do Governo do Estado do Amazonas. Disponível em: <<http://www.amazonas.am.gov.br/2011/11/governador-omar-aziz-inaugura-brasjuta-resultado-da-primeira-parceria-publico-privada-feita-por-meio-da-afeam/>>. Acesso em: 9 de março de 2012.

ALAM, M. K; LEHMANN, E. H. & KHAN, M. A.: *Comparative study of water absorption behavior in Biopol and jute-reinforced Biopolcomposite using neutron radiography technique*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 25. n. 11, 2006.

ALIBABA: *Folha de fibra de banana*. Artes de Minas. Disponível em <[http://portuguese.alibaba.com/free-suppliers\\_br108897551](http://portuguese.alibaba.com/free-suppliers_br108897551)>. Acesso em: 12 de agosto de 2012.

ALVAREZ, V. A.; RUSECKAITE, R. A. & VÁZQUEZ, A.: *Degradation of sisal fibre/Mater Bi-Y biocomposites buried in soil*. Polymer Degradation and Stability, Vol. 91. pp. 3156-3162, 2006.

ANGELO, H. *As exportações brasileiras de madeiras tropicais*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1998.

ANGELO, H.; BRASIL, A.A. & SANTOS, J.: *Madeiras tropicais: análise econômica das principais espécies florestais exportadas*. ACTA Amazônica, 2001.

ANGELO, H.; SILVA D. A.: *As exportações brasileiras de mogno (Swetênia macrophylla King)*. Revista Árvore. Vol. 22, pp. 113-121, 1997.

AQUINO, E. M. F. *Estudo da umidade na resistência e fratura de compósitos tubulares*. IV Congresso de engenharia mecânica N/NE. Recife, 1996.

AQUINO, E. M. F. S. & SILVA, R. V.: *Curaua fiber: a new alternative to polymeric composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 27, 1. pp103-112, 2008.

ASTM D 3039/D3039M-08: *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. In: Annual Book of ASTM standards, 15.03. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2008.

ASTM D 3878-95: *Standard terminology for composite materials*, Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 1995.

ASTM D 570-98/05: *Standard test method for water absorption of plastics*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2005.

ASTM D 790-07: *Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. In: Annual Book of ASTM standards, 8.01. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2007.

ASTM D 792-08: *Standard test for methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2008.

ASTM E 11-95: *Standard specification for wire cloth and sieves*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 1995.

ASTM E 220-07a: *Standard test method for calibration of thermocouples by comparison techniques*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2007.



ASTM E 691-11: *Standard practice for conducting an interlaboratory study to determine the precision of a test method*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2011.

ASTM G 151-09: *Standard practice for exposing nonmetallic materials in accelerated test devices that use laboratory light sources*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2009.

ASTM G 53-96: *Standard practice for operating light- and water-exposure apparatus (fluorescent UV-condensation type) for exposure of nonmetallic materials*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 1996.

ASTM G7/G7M-11: *Standard practice for atmospheric environmental exposure testing of nonmetallic materials*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2011.

AVELLA, M.; LA ROTA, G.; MARTUSCELLI, E.; RAIMO, M.; SADOCCO, P.; ELEGIR, G. & RIVA, R.: *Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and wheat straw fiber composites: thermal, mechanical properties and biodegradation behavior*. Journal of Materials Science, Vol. 35. pp. 829-836, 2000.

AVÉROUS, L. & LE DIGABEL, F.: *Properties of biocompósitos based on lignocellulosic fillers*. Carbohydrate Polymers, Vol. 30, 2006.

AZEVEDO, C. P.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, J. N. M.; MACHADO, S. A.; SOUZA, C. R. & De OLIVEIRA, M. M.: *Simulação de estratégias de manejo florestal na Amazônia com o uso do modelo SYMFOR*. ACTA Amazonia, Vol. 38. n. 1. pp. 51-70, 2008.

AZIZ, S. H.; ANSELL, M.; CLARKE, S. J. & PANTENY, S. R.: *Composites Science and Technology*, 65, p.525, 2005.

BAMBROTEX: *Fibra natural de bamboo*. Disponível em: <[http://www.bambrotex.com/second/showroom\\_fiber.htm](http://www.bambrotex.com/second/showroom_fiber.htm)>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

BATTERHAM, I. & RAI, R.: *A comparison of artificial ageing with 27 years of natural ageing*. AICCM Book, Paper and Photographic Materials Symposium, 2008.

BATTERHAM, I. H.; WEIGHTMAN, M. L. & HAMILTON, W. S.: *A comparative study of six writing papers after artificial aging*. College of Advanced Education (Materials Conservation Section) - Canberra, 1980.

BELMARES, H.; BARRERA, A.; CASTILLO, E.; VERHEUGEN, V. E.; MONJARAS, M.; PATFORT, G. A. & BUEQUOYE, E. N.: *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* 20, 555, 1981.

BISMARCK, A.; MISHRA, S. & LAMPKE, T.: *Plant fibers as reinforcement for green composites*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

BOEGLIN, N.; TRIBOULOT, P. & MASSON, D.: *A feasibility study on boards from wood and bending properties, dimensional stability and plastic waste: recycling of the board*. In Holz als Roh-und Werkstoff, Vol. 55. pp. 13 -16, 1997.

BPMCC – DEM/UFRN: *Base de pesquisa em materiais compósitos e cerâmicos*. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

CALLISTER JR, W. D.: *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. Rio de Janeiro, Ed. LTC, 2002.

CARASHI, J. C. & LEAO, A. L.: *Congresso Brasileiro de Polímeros*, in: Anais do 6º Congresso Brasileiro de Polímeros. Gramado - RS. pp. 566, 2001.

CEN-STANDARD TR 15932: *Plastics - Recommendation for terminology and characterization of biopolymers and bioplastics*. European Committee for Standardization. Brussels, 2010.

DANTAS, C. M.: *Influência da quantidade de absorção de água nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos de manta de fibra de vidro e tecido juta*. Dissertação de Mestrado.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

DASH, B. N.; SARKAR, M.; RANA, A. K.; MISHRA, M.; MOHANTY, A. K. & TRIPATHY, S. S.: *A study on biodegradable composite prepared from jute felt and polyesteramide (BAK)*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 21, n. 16, 2002.

DENCE, C. W. & REEVE, D. W.: *Pulp bleaching –principles and practice*. Tappi Press: Atlanta, 1996.

DIAS, A. G.: *Polímeros naturais*. Jornal dos Plásticos. Rio de Janeiro: DQO/Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2008.

DIRECTIVE 2000/53/EC.: *On end-of life vehicles*. The European Parliament and of The council. 18 September 2000.

E. E. A. Alterações Climáticas. Agência Europeia do Ambiente. Artigos e Relatórios. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/pt/themes/climate/about-climate-change>> Acesso em: 18 de novembro de 2012.

FELDMAN, D.: *Polymer weathering: photo-oxidation*. Journal of Polymers and the Environment, Vol. 10, n. 4, 2002.

FELIPE, R. N. B.: *Efeitos da Radiação UV, Temperatura e Vapor Aquecido nos Compósitos Poliméricos: Monitoramento, Instabilidade Estrutural e Fratura*. Tese de Doutorado. PPGEM/UFRN. Setembro de 2012.

FELLER, R. L.: *Accelerated aging: photochemical and thermal aspects*. The Getty Conservation Institute. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. USA, 1994.

FREIRE JR, R. C. S.: *Estudo da Prevenção de Falha por Fadiga em Laminados de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro*. Dissertação de Mestrado, pp.155. PPGEM - UFRN. 2001.

FREIRE JÚNIOR, R. C. S.; DORIA NETO, A. D. & AQUINO, E. M. F.: *Comparative study between ANN models and conventional equations in the analysis of fatigue failure of GFRP*. International Journal of Fatigue. n. 31. pp 831–839, 2009.

GOMES, L. V. N.: *Artes do desenho: Desenhismo*. Santa Maria – RS, Ed. U.F.S.M., 2003.

HEN, Y.; SUN, L.; CHIPARUS, O.; NEGULESCU, I.; YACHMENEV, V. & WARNOCK, M.: *Kenaf/Ramie Composite for Automotive Headliner*. Journal of Polymers and the Environment. April, 2005.

HORNSBY, P. R.; HINRICHSSEN, E.; TARVERDI, K.: *Preparation and properties of polypropylene composites reinforced with wheat and flax straw fibers: part II analyses of composite microstructure and mechanical properties*. Journal of Materials Science, Vol. 32. n. 4. pp. 1009-1015, 1997.

HUANG, X. & NETRAVALI, A. N.: *Biodegradable green composites made using bamboo micro/nano-fibrils and chemically modified soy protein resin*. Composite Science and Technology, Vol. 69, 2009.

HULL, D. & CLYNE, T. W.: *An Introduction to composite materials*. Second Edition. Cambridge Solid State Science Series. Cambridge University Press, 1996.

ISLAM, M. N.; ZAMAN, M. A. & KHAN, M. A.: *Study of the Defects and Water Absorption Behavior in Jute-reinforced Polymer Composites using Film Neutron Radiography*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 24. n. 16, 2005

JETSON GREEN.: *Materials - E2e offers new biocomposites materials* Acesso: <<http://www.jetsongreen.com/2011/12/e2e-biocomposite-building-materials.html>>. Disponível em: 10 de fev. 2011.

JONH, M. J. & THOMAS, S.: *Review: Biofibres and biocomposites*. Carbohydrates Polymers, Vol. 71, 2008.

KARUS, M. & KAUP, K.: *Natural fibres in the european automotive industry*. Journal of Industrial Hemp, Vol. 7. n. 1, 2002.

KHALIL, H. P. S.; POH, B. T.; JAWAID, M.; RIDZUAN, R.; SURIANA, R.; SAID, M. R.; AHMAD, F. & NIK FUAD, N. A.: *The effect of soil burial degradation of oil palm trunk fiber-filled recycled polypropylene composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 29, n. 11, 2010.

KITAGAWA, H.; ISHIAKU, U. S.; MIZOGUCHI, M. & HAMADA, H.: *Bamboo-based ecocomposites and their potential applications*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

KOZLOWSKI, R.; BARANIECKI, P. & BARRIGA-BEDOYA, J.: *Bast fibres*. In Biodegradable and Sustainable Fibers. ed. Blackburn. R. S. CRC Press. Boca Raton – Florida, 2005.

LA COUNTA, B. J.; CASTRO, J. M. & IGNATZ-HOOVERB, F.: *Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds II. Design and development of an accelerated outdoor aging simulator*. Polymer Degradation and Stability, Vol. 75 pp. 213–227, 2002.

LE DUIGOU, A.; DAVIES, P. & BAILEY, C.: *Seawater ageing of flax/poly(lactic acid) biocomposites*. Polymer Degradation and Stability, Vol. 94, 2009.

LEÃO, M. A.; AQUINO, E. M. F.; TINÔ, S. R. L. & FONTES, R. S.: *Licuri fibers: alternative reinforcement to polymeric composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 30(6). pp516–523, 2011.

LIM, C. W.; LIEW, K. M. & KITIPORNCHAI, S.: *Vibration of cantilevered laminated composite shallow conical shells*. Journal of Solid Structures, Vol. 35. n. 15, 1998.

LUNDGREEN, H. P. & O'CONNEL, R. A.: *Ind. Eng. Chem.* In Advances in Protein Chemistry, Vol. 4. Ind. ed, 1948.

LUO, S. & NETRAVALLI, A. N.: *Journal Material Science*, Vol. 20. pp. 367, 1999.

MANO, E. B.: *Polímeros como materiais de engenharia*, São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1991.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; BRANCIFORTI, M. C.; KOBAYASHI, M. & NOBRE, A. D.: *Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MATERIAL THOUGHTS.: *Fiber reinforced plastic use*. Plastic News. August, 2002.

MATTOSO, L. H. C.; PEREIRA, N. C.; SOUZA, M. L. & AGNELLI, J. A. M.: *EMBRAPA produção e informação*, in: ODILON R. R. F. da S.; NAPOLEÃO E. D. M. B. (Org.). O Agro Negócio do Sisal no Brasil. 1. ed. pp.161, 1999.

MEHTA, G.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; KAMDEM, D. P. & MISRA, M.: *Effect of accelerated weathering on biocomposites processed by SMC and compression molding*. J. Polym. Environ, n. 14. pp. 359–368, 2006.

MERCADO, R. S. & CAMPAGANINI, S.: *Exportações da floresta amazônica*. Encontro de Economia Florestal 1 (Anais). Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Floresta. Vol. 2, pp. 43-73. Curitiba, 1988.

MERCADO, R. S.: *A indústria madeireira na amazônica: estrutura, produção e mercado*. Tese de Doutorado. Michigan State University. USA, 1980.

MISHRA, S.; TRIPATHY, S. S.; MISRA, M.; MOHANTY, K. & NAYAK, S. K.: *Novel eco-friendly biocompósitos: biofiber reinforced biodegradable polyester amide composites – fabrication and properties evaluation*. Journal of Reinforced Plastic and Composites, Vol. 21 – no. 1, 2002.

MO, X.; WANG, D. & SUN, X. S.: *Straw-based biomass and biocompósitos*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

MOHANTY, A. K.; KHAN, M. A. & HINRICHSEN, G.: *Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics-polyester amide composites*. Composites: Part A, Vol. 31. pp. 143–150, 2000.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M. & DRZAL, L. T.: *Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview*. Composite Interfaces, Vol. 8, 2001.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T.; SELKE, S. E.; HARTE, B. R.; HINRICHSEN, G.: *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites: an introduction*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

MOHANTY, A.K. & MISRA, M.: *Studies on Jute Composites – A Literature Review*. Polymer-Plastics. Technology and Engineering, Vol. 34, pp. 729-792, 1995.

MUNDER, F.; FÜRL, C. & HEMPEL, H.: *Processing of bast fiber plants for industrial application*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

NAM, S. & NETRAVALI, A. N.: *Green composites I: physical properties of ramie fibers for environment-friendly green composites*. Fibers and Polymers, Vol.7. n. 4, pp. 372-379, 2006a.

NAM, S. & NETRAVALI, A. N.: *Green composites. II: environment-friendly, biodegradable composites using ramie fibers and soy protein concentrate (SPC) resin*. Fibers and Polymers, Vol. 7 – no. 4, 2006b.

NEELAKANTA, M. I. N.; ZACHARIA, N. O. & SABU T.: *A study of the mechanical properties of randomly oriented short banana and sisal hybrid fiber reinforced polyester composites*. Journal of Applied Polymer Science, Vol.96, n. 5, pp. 1699-1708, 2005.

NING: Juta e Malva - Governo do Amazonas inaugura primeira parceria público-privada da AFEAM. Ning Industria Textil e do Vestuário. Disponível em: <<http://textileindustry.ning.com/forum/topics/juta-e-malva-governo-do-amazonas-inaugura-primeira-parceria-publi>>. Acesso em 03 de abril de 2012.

OLIVEIRA, J. F. S. *Estudos da configuração e condições ambientais adversas em compósitos poliméricos híbridos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.

OWEN, E. D.: *Degradation and stabilization of PVC*. Elsevier Applied Science, 1984.

PAUTAS NA WEB: *Fabricação manual e industrial da fibra de juta na região amazônica*. Disponível em: <<http://pautasnaweb.wordpress.com/2012/05/27/juta-e-malva-sao-plantadas-as-margens-do-rio-em-plena-floresta-amazonica/>>. Acesso em: 12 de agosto de 2012.

PEREIRA, J. C.: *Curso de projeto estrutural com materiais compostos*. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

PETERS, S. T.: *Handbook of composites*. Chapman & Hall. Cambridge University Press, 1998.

PIONEER SAWDUST: *Precisely screened, clean, kiln-dried white pine sawdust*. Disponível em: <<http://www.pioneersawdust.com/sawdust.html>>. Acesso em: 10 de março de 2012.

PORCK, H. J.: *Rate of paper degradation: the predictive value of artificial aging tests*. European Commission on Preservation and Access – Amsterdam, 2000.



POTHAN, L. A.; CHERIAN, B. M.; ANANDAKUTTY, B. M. & THOMAS, S.: *Effect of layering pattern on the water absorption behavior of banana/glass hybrid composites*. Journal Of Applied Polymer Science. Vol. 105. pp. 2540-2548, 2007.

QUEIROZ, E. S. P.: *Análise da indústria de beneficiamento primário de madeira no estado do Pará*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1983. 92p.

RASCH, R. H. & STONE, C. D.: *Estimating Stability of Paper by Heating*. Paper Trade Journal, Vol. 95. pp. 28-30, 1932.

RAVEN P. H.; EVERT R. F. & EICHHORN S. E.: *Biologia Vegetal*. ed. 7. Editora Guanabara Koogan S. A. Rio de Janeiro, 2007.

REINCHOLD: *Boletim técnico – RESAPOL 10134*. Reinhold Inc. EUA, 2000.

REINCHOLD: *Guia de produtos compostos*. Reinhold do Brasil, 2012.

ROBERT, M.; COUSIN, P. & BENMOKRANE, B.: *Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete*. Journal of Composites for Construction, Vol. 13. n. 2, April 2009.

RODRIGUES, L. P. S. *Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal 2007.

RODRIGUES, L. P. S.; SILVA, R. V. & AQUINO, E. M. F.: *Effect of accelerated environmental aging on mechanical behavior of curaua/glass hybrid composite*. Journal of Composite Materials, Vol. 46. n. 17, 2012.

RONGZHI LI.: *Environmental degradation of wood-HDPE composite*. Polymer Degradation and Stability, Vol. 70. pp. 135-145, 2000.

ROZMAN, H. J. D.; ISHAK, Z. A. M. & ISHIAKU, U. S.: *Oil palm fiber–thermoplastic composites*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

SALYER, I. O. & USMANI, A. M.: *Utilization of bagasse in new composite building materials*. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, Vol. 21, 1982.

SANTOS, J. & HUMMEL, A. C.: *Situação das exportações das madeiras serradas, laminadas e compensadas do estado do Amazonas*. In Encontro de Economia Florestal 1(Anais). Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Floresta. Vol. 2, pp. 415-430. Curitiba, 1988.

SANTOS F., R. C. T.: *Envelhecimento ambiental acelerado em PRF a base de tecidos híbridos kevlar/vidro: propriedades e instabilidade estrutural*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Natal, 2012.

SAPTHARISHI, L.V.: *United Nations development programme on nonconventional uses of jute* (IND/92/302). 1992–97 IJIRA, Calcutta - India, 1992.

SELDÉN, R.; NYSTRÖM, B. & LÅNGSTRÖM, R.: *UV aging of poly(propylene)/wood-fiber composites*. Polymer Composite, Vol. 25. n. 5, 2004.

SEREDA & LITRAN: *Durability of building materials and components*. STP 691. ASTM. Sereda & Litran Editors, 1980.

SHAH, B. L.; SELKE, S. E.; WALTERS, M. B. & PATRICIA A. HEIDEN, P. A.: *Effects of wood flour and chitosan on mechanical, chemical, and thermal properties of polylactide*. Polymer Composites, Vol. 29. n. 6, 2008.

SHIN, K.; KIM, C & HONG, C.: *Correlation of accelerated aging test to natural aging test on graphite-epoxy composite materials*. Journal of Reinforced Plastics & Composites, Vol. 31. September 2012.

SHOKRIEH, M. M & BAYAT, A.: *Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites*. Journal of Composite Materials, Vol. 41, n. 20, 2007.



SILVA, L. C. F. *Utilização de resíduo lignocelulósico na obtenção de chapa de madeira aglomerada homogênea e compósito reforçado com fibra de vidro-E*. Dissertação de Mestrado.

SILVA, L. C. F.: *Utilização de resíduo lignocelulósico na obtenção de chapa de madeira aglomerada homogênea e compósito reforçado com fibra de vidro-E*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

SILVA, L. C. F.; LAHR, F. R. & AQUINO, E. M. F.: *Presence of excessive moisture and damage mechanism in alternative hybrid configurations of GFRP*. Journal of Composite Materials. Vol. 45, 3. pp. 369-383, 2011.

SINGH, B. & GUPTA, M.: *Natural fiber composites for building applications*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CULTURA JAPONESA: *Uma epopéia moderna 80 anos da imigração japonesa no Brasil*. Comissão de Elaboração da História dos 80 Anos da Imigração Japonesa no Brasil. Ed. Hucitec – São Paulo, 1992.

STARK, N. M. & MUTUANA, L. M.: *Surface chemistry changes of weathered HDPE/wood-flour composites studied by XPS and FTIR spectroscopy*. Polymer Degradation and Stability, Vol. 86. n. 1. pp. 1-9, October 2004.

STOKKE, D. D.: *Alternative low-cost biomass for the biocomposites industry*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

SUDDELL, B. C.; EVANS, W. J.: *Natural fiber composites in automotive applications*. Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis, 2005.

TINÔ, S. R. L.: *Descontinuidade na seção transversal em laminados compósitos poliméricos: efeitos e propriedades*. Dissertação de mestrado. PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

TONG, J. W.; XIE, M. X. & SHEN, M.: *The interlaminar stresses of symmetric composite laminates*. Journal of Reinforced Plastics and Composites. Vol. 23, n. 10, 2004.

TOSCANAPA: *Programma regionale di azioni innovative: innovazione tecnologica in Toscana*. Progetto executivo. Grupo Fibranopa. Itália, 2010.

ULLMANN, C.: *Sustentáveis e com sotaque carioca*. abcDesign. Disponível: <http://abcdesign.com.br/por-assunto/artigos/sustentaveis-e-com-sotaque-carioca/>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2012.

VADLAMANI, D.: *Strain Energy Density Based Failure Criterion for GFRP Coupons Under Tension and Bending*. Tese de Mestrado. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. West Virginia University. 2007.

VICENTE, J. R.: *The tropical timber trade and sustainable development*. Science. n. 256. pp. 1651-1656, 1992.

VILAPLANA, F.; STRÖMBERG, E. & KARLSSON, S.: *Environmental and resource aspects of sustainable biocompósitos*. Polymer Degradation and Stability. n. 95, 2010.

WHITE, N. M. & ANSELL, N. P.: *Straw-reinforced polyester composites*. Journal of Materials Science, Vol. 18. n. 5. pp. 1549-1556, 1983.

WINFIELD, A. G.: *Jute reinforced polyester projects for UNIDO/Government of India*. Plastic Rubber Int., Vol. 4, 1979.

XIAOMING LI, Y. & WEITSMAN, J.: *Sea-water effects on foam-cored composite sandwich lay-ups*. Composites: Part B. n. 35 pp. 451-459, 2004.

YOSOMIYA, R.; MORIMITO, K.; NAKAJIMA, A.; IKADA, Y. & SUZUKI, T.: *Adhesion and bonding in composites*. New York, Marcell Dekker, 1989.

YOUNGQUIST, J. A.; ENGLISH, B. E.; SPELTER, H. & CHOW, P.: *Agricultural fibers in composition panels*. In: 27th International Particleboard/Composite Materials Symposium. Washington State University; pp. 133-152, 1993.

ZOU, X; UESAKA, T & GURNAGUL, N.: *Prediction of paper permanence by accelerated aging I: kinetic analysis of the aging process*. Chemistry and Materials Science, Vol. 3. n. 1, pp. 243-267, 1996.